



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

LUANA KANN KELCH VIEIRA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM QUEBRA-
MAR CONSTRUÍDO A PARTIR DE GARRAFAS DE POLITEREFTALATO
DE ETILENO (PET)**

Campinas - SP

2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

LUANA KANN KELCH VIEIRA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM QUEBRA-
MAR CONSTRUÍDO A PARTIR DE GARRAFAS DE POLITEREFTALATO
DE ETILENO (PET)**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado
da Universidade Estadual de Campinas para a
obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração:
Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Orientador:
Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli

Este exemplar corresponde à versão final da
dissertação defendida pela aluna, e orientada
pelo Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli.

Campinas - SP

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

V673d Vieira, Luana Kann Kelch
Desenvolvimento e análise de desempenho de um
quebra-mar construído a partir de garrafas de
politereftalato de etileno (pet) / Luana Kann Kelch
Vieira. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Tiago Zenker Gireli.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Quebra-mares. 2. Costa - Proteção. 3. Dissipação
de energia. I. Gireli, Tiago Zenker. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Developoment and performance analysis of polyethylene terephthalate
(pet) bottle floating break-water

Palavras-chave em Inglês: Breakwaters, Protection shore, Power dissipation

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Alberto Luiz Francato, Geraldo Freitas Maciel

Data da defesa: 20-04-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

LUANA KANN KELCH VIEIRA

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM QUEBRAMAR CONSTRUÍDO A PARTIR DE GARRAFAS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado do Departamento de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais da Universidade Estadual de Campinas.

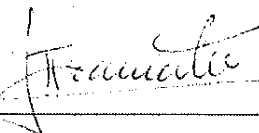
Campinas, 20 de abril de 2012.



Prof. Dr. Thiago Zenker Gireli,

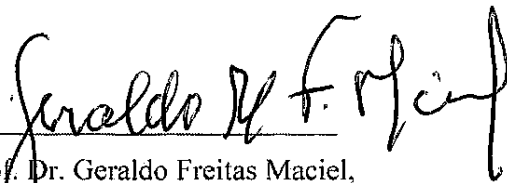
Orientador

Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Alberto Luiz Francato,

Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Geraldo Freitas Maciel,

Universidade Estadual Paulista

RESUMO

O desenvolvimento econômico brasileiro tem gerado a necessidade de melhoria no transporte e logística dos produtos que circulam pelo país. O transporte marítimo é a opção menos poluente e menos custosa para o transporte de mercadorias. Com o aumento da demanda neste segmento surge o interesse por alternativas ecológicas e economicamente mais atrativas. Como parte integrante do projeto de um terminal portuário, obras de abrigo são necessárias na grande maioria dos casos. Nesse contexto, foi resgatada a importância da pesquisa e inovação do quebra-mar flutuante. Além disso, o quebra-mar também pode promover proteção costeira, outra discussão muito atual. O quebra-mar desenvolvido e estudado nesse trabalho é uma inovação e possui vantagens dentre as concepções praticadas atualmente. O conceito ecológico de empregar garrafas PET descartadas, eliminando-as do ambiente, cria um interesse ímpar por parte dos ambientalistas. Economicamente esse quebra-mar é mais vantajoso, pois os materiais são de baixo custo e de fácil aquisição. E também pode ser construído em terra e rebocado para a posição, no corpo d'água, eliminando as dificuldades e custos de uma construção a partir de plataformas destacadas e flutuantes. Por último, ressalta-se a eficiência na redução da altura de onda, pois esta foi significativamente maior que a encontrada por pesquisadores que testaram concepções comparáveis a essa.

Palavras-chave: Quebra-mar flutuante. Proteção costeira. Obra de abrigo ecológica.

ABSTRACT

The growth of the Brazilian economy urges for improvement in transportation and logistics for products that move through the country. Seaways are the less pollutant and the most cost effective way to move ware. The increasing demand for this segment creates interest in more environmentally friendly and cheaper options and sheltering installations are part of a port's design. Within this scenario, the relevance of research and innovation for floating breakwater is recovered. Furthermore breakwater can as well provide coastal protection, which is an existent concern in modern time. The floating breakwater that is being discussed in this paper is an innovative and advantageous when compared to others that are in use have been designed and built. Due to the reuse of many plastic bottles and regarding the fact that they are being taken away from the waste environment, this floating breakwater creates a good impact on the ecologists. From the economic point of view it is less expensive due to the fact of the purchase of used plastic bottles to be cheap and easy. Also, the breakwater can be constructed on shore and dragged to position which eliminates the complexity and cost of building of a vessel. Its efficiency in wave height reduction goes significantly beyond the reduction ratio of other concepts that are comparable to this floating breakwater.

Key- words: Floating breakwater. Shore protection. Environmentally friendly wave barrier.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - SOBREPOSIÇÃO DE ONDAS EM SUPERFÍCIES AQUÁTICAS.....	22
FIGURA 2 - EFEITO DE ÁGUA RASA NO MOVIMENTO ORBITAL DAS PARTÍCULAS.....	25
FIGURA 3 - GRÁFICO DE EMPOLAMENTO.....	27
FIGURA 4 - BATEDOR PIVOTANTE.....	29
FIGURA 5 - BATEDOR DE PISTÃO.....	29
FIGURA 7 - BATEDOR TIPO CUNHA	30
FIGURA 7 - BATEDOR TIPO PNEUMÁTICO	30
FIGURA 8 - CANAL MISTO DA COPPE.....	31
FIGURA 9 - QUEBRA-MAR DE TALUDE.....	32
FIGURA 10 - QUEBRA-MAR DE PAREDE VERTICAL.....	32
FIGURA 11 - QUEBRA-MAR DE BERMA.....	33
FIGURA 12 - RECIFE ARTIFICIAL	33
FIGURA 13 - QUEBRA-MAR HIDRÁULICO OU PNEUMÁTICO.....	34
FIGURA 14 - QUEBRA-MAR FLUTUANTE.....	34
FIGURA 15 - QUEBRA-MAR FLUTUANTE TIPO ESTEIRA.....	38
FIGURA 16 - ARRANJO DO QUEBRA-MAR DE AÇO ENSAIADO PELO BEACH EROSION BOARD NOS EUA NOS ANOS 50	43
FIGURA 17 - CORTE DO MÓDULO ELABORADO POR VELDEE.....	44
FIGURA 18 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA INSTALAÇÃO DO QUEBRA-MAR TIPO PT.....	45
FIGURA 19 - PLANTA DO MÓDULO PT-1	46
FIGURA 20 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO MÓDULO PT.....	47
FIGURA 21 - SOMATÓRIA DE FORÇAS NOS ELEMENTOS FLUTUANTE DO MÓDULO PT.....	48
FIGURA 22 - MÓDULO PT ANCORADO NO CANAL DO CERC.....	49
FIGURA 23 - MÓDULO PT SENDO ENSAIADO NO CANAL DO CERC.....	49
FIGURA 24 - IMAGEM DO QUEBRA-MAR TIPO PT INSTALADO EM MAMARONECK, NY, EUA.....	50
FIGURA 25 - IMAGEM DO QUEBRA-MAR TIPO PT INSTALADO EM MAMARONECK, NY, EUA.....	51
FIGURA 26 - DEFINIÇÕES DA ONDA ESTATICAMENTE.....	55
FIGURA 27 - REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE ZERO ASCENDENTE.....	57
FIGURA 28 - O CANAL DE ONDAS NO LHEPUSP	58
FIGURA 30 - DETALHES CONSTRUTIVOS DO CANAL DE ONDAS DO FCTH.....	60
FIGURA 31 - LASTRO DE ARGAMASSA NO CANAL DE ONDAS.....	61
FIGURA 32 - ESQUEMA DO CONTROLE DO BATEDOR DE ONDA DO LHEPUSP.....	61
FIGURA 33 - VISTA SUPERIOR DO BATEDOR DE PLACA VERTICAL.....	62
FIGURA 34 - FUSO DO BATEDOR DE ONDAS	62
FIGURA 35 - PLACA VERTICAL	63
FIGURA 36 - FILTRO METÁLICO	64

FIGURA 37 - ABSORVEDORES DE ENERGIA A BARLAMAR E SOTAMAR, RESPECTIVAMENTE.....	64
FIGURA 38 - GARRAFAS SENDO VEDADAS COM VEDAROSCA	67
FIGURA 39 - MONTAGEM DOS BLOCOS	67
FIGURA 40 - BLOCOS ENFILEIRADOS.....	68
FIGURA 41 - BLOCO ENVOLTO POR ESTRIBO	69
FIGURA 42 - CROQUI DA ESTRUTURA DE AÇO.....	69
FIGURA 43 - MONTAGEM DA ARMADURA.....	70
FIGURA 44 - MODELO COM GAIOLA MONTADA	70
FIGURA 45 - 4 CABOS DE ANCORAGEM DE BARLAMAR PASSANDO PELOS OLHAIS E FIXOS A 4 CATRACAS NA BORDA NO CANAL	71
FIGURA 46 - CABO DE ANCORAGEM PRESO À GAIOLA	71
FIGURA 47 - CAVALETE METÁLICO	72
FIGURA 48 - CAVALETE INVERTIDO E INSTALADO	73
FIGURA 49 - DESENHO ESQUEMÁTICO EM PLANTA DO SISTEMA DE ANCORAGEM DO MODELO	73
FIGURA 50 - VISTA ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE ANCORAGEM	73
FIGURA 52 - CATRACA PRESA À BORDA DO CANAL QUE RECEBE CABO DE ANCORAGEM	74
FIGURA 53 - ESQUEMA EM PLANTA DA TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA	75
FIGURA 54 - PLACA BATEDORA DO GERADOR DE ONDAS	76
FIGURA 55 - ESTAÇÃO DE CONTROLE DO GERADOR DE ONDAS	76
FIGURA 56 - GRÁFICO INSTANTÂNEO GERADO PELO PROGRAMA CONTROLE DE GERAÇÃO DE ONDAS.....	77
FIGURA 57 - PONTA LIMNIMÉTRICA INSTALADA SUPORTANDO A PONTA CAPACITIVA CONECTADA.....	77
FIGURA 58 - EQUIPAMENTOS MONTADOS PARA ENSAIO DINÂMICO	78
FIGURA 59 - FLEXÃO DO MODELO	81
FIGURA 60 - SOBRECARGA NO MODELO	82
FIGURA 61 - GRÁFICO DE REDUÇÃO DE ALTURA RELACIONADO COM O COMPRIMENTO DE ONDA.....	87
FIGURA 62 - GRÁFICO DE REDUÇÃO DE ALTURA RELACIONADO COM A ESBELTEZ DA ONDA	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS DE GRAVIDADE CONFORME PROFUNDIDADE.....	24
TABELA 2 - TIPOS DE QUEBRA-MARES FLUTUANTES	35
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS PET	41
TABELA 4 - ESCALA GERADA PELA SEMELHANÇA DE FROUDE	54
TABELA 5 - QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTURAS DE ONDA	57
TABELA 6 - MATERIAIS UTILIZADOS	66
TABELA 7 - RELAÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO E EQUIPAMENTOS PARA ENSAIO DINÂMICO	75
TABELA 8 - ONDAS ENSAIADAS	84
TABELA 9 - RESULTADOS TEÓRICOS DO ENSAIO DINÂMICO	85
TABELA 10 - TABELA DE REDUÇÃO DE ALTURA DE ONDA.....	86
TABELA 11 - PROFUNDIDADES NOS PONTOS DE INTERESSE DO ENSAIO	88
TABELA 12 - ANÁLISE DO EFEITO DE FUNDO.....	89

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{E}	densidade de energia	$[MT^{-2}]$
ν	viscosidade cinemática	$[L^2T^{-1}]$
C_t	taxa de redução H_t/H	$[]$
d	diâmetro hidráulico	$[L]$
e	fator de escala	$[]$
E	Empuxo	$[MLT^{-2}]$
E_k	energia cinética	$[ML^2T^{-2}]$
E_p	energia potencial	$[ML^2T^{-2}]$
f	frequência da onda	$[T^{-1}]$
F	número de Froude	$[]$
f'	frequência da onda em escala reduzida	$[T^{-1}]$
F_c	componente vertical da força	$[MLT^{-2}]$
F_m	força máxima no cabo de ancoragem	$[MLT^{-2}]$
F_{tv}	força total vertical	$[MLT^{-2}]$
g	aceleração da gravidade ($9,81m/s^2$)	$[LT^{-2}]$
H	altura de onda incidente	$[L]$
h	Profundidade	$[L]$
H'	altura de onda em escala reduzida	$[L]$
H_0	altura de onda em água profunda (sem emplolamento)	$[L]$
H_t	altura de onda resultante	$[L]$
k	número de onda	$[]$
K_s	fator de emplolamento	$[]$
L	comprimento do quebra-mar	$[L]$
L'	comprimento do quebra-mar em escala reduzida	$[L]$
$l_{12,5}$	comprimento das barras de aço Φ 12,5mm	$[L]$
$l_{4,2}$	comprimento das barras de aço de Φ 4,2mm	$[L]$
M_g	massa da gaiola	$[M]$
M_m	massa do modelo	$[M]$
N	número de módulos	$[]$
n	número de garrafas	$[]$

\emptyset	Diâmetro	[L]
R	redução da altura de onda (H_t/H)	[]
Rey	número de Reynolds	[]
T	período da onda	[T]
T'	período da onda em escala reduzida	[T]
V	Velocidade	[LT ⁻¹]
V _g	volume da garrafa	[L ³]
δ	esbeltz da onda	[]
η	elevação da superfície livre	[L]
λ	comprimento de onda	[L]
λ'	comprimento de onda em escala reduzida	[L]
λ/L	relação comprimento de onda e comprimento do quebra-mar	[]
Π	constante pi (3,14)	[]
Φ	Bitola	[L]
ω	frequência angular ($2\pi/T$)	[T ⁻¹]

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	6
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE SÍMBOLOS	9
SUMÁRIO	11
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVO	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 ONDAS DE SUPERFÍCIE EM CORPO D'ÁGUA	21
3.1.1 EFEITOS DE ÁGUAS RASAS	23
3.1.1.1 DIFRAÇÃO	25
3.1.1.2 REFRAÇÃO	25
3.1.1.3 ARREBENTANÇA	25
3.1.1.4 REFLEXÃO	26
3.1.1.5 EMPOLAMENTO	26
3.1.2 GERAÇÃO DE ONDAS	27
3.2 QUEBRA-MAR	31
3.2.1 OBRA CONVENCIONAL	31
3.2.2 OBRA NÃO-CONVENCIONAL	33
3.2.2.1 QUEBRA-MAR FLUTUANTE TIPO ESTEIRA	37
3.3 O USO DA GARRAFA PET	40
3.4 ESTUDO DE CASO 1	42
3.5 ESTUDO DE CASO 2	43
3.6 ESTUDO DE CASO 3	45
4 MATERIAIS E MÉTODOS	53

4.1	A TEORIA LINEAR DE ONDAS	55
4.2	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	57
4.3	O CANAL DE ONDAS	57
4.4	DIMENSIONAMENTO DO MODELO	65
4.4.1	COMPRIMENTO.....	65
4.4.2	LARGURA.....	65
4.4.3	ALTURA	66
4.5	DESENVOLVIMENTO DO QUEBRA-MAR EM MODELO REDUZIDO	66
4.6	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....	72
4.6.1	ENSAIO ESTÁTICO	72
4.6.2	ENSAIO DINÂMICO	74
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.1	ENSAIO ESTÁTICO	79
5.2	RESULTADOS DO ENSAIO DINÂMICO	82
5.2.1	ONDAS ENSAIADAS.....	82
5.2.1.1	ALTURA	83
5.2.1.2	PERÍODO	83
5.2.1.3	FREQUÊNCIA.....	83
5.2.1.4	LIMITES DO CANAL.....	83
5.2.2	REDUÇÃO DE ONDAS E COMPORTAMENTO DO MODELO	85
5.2.3	EFEITO DE FUNDO NA REDUÇÃO DE ALTURA.....	88
5.2.4	LIMITE DO MODELO.....	90
5.3	DISCUSSÃO GERAL.....	90
5.4	ASSUNTOS A SEREM PESQUISADOS FUTURAMENTE	93
6	CONCLUSÃO.....	97
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
	ANEXOS	102

ANEXO A - GRÁFICOS DA REDUÇÃO DE ONDA	103
ANEXO B - ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	112
ANEXO C - REDUÇÃO.....	119
ANEXO D - PROCESSO DE CÁLCULO DO EMPOLAMENTO	129

1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento de áreas costeiras é importante para o desenvolvimento econômico e social, possibilitando o uso da localização estratégica para o escoamento de mercadorias e pessoas via transporte marítimo ou terrestre. Porém, as condições naturais podem não ser suficientes para a construção e operação das instalações que suportam estes serviços. Surgem então as obras de abrigo, sendo o quebra-mar um de seus tipos.

Enquanto outras obras protegem o terminal de correntes e de transporte de sedimentos, o quebra-mar atua na redução de altura de onda. Esta é uma estrutura marítima, cuja principal função é a redução de altura de onda incidente. A redução de altura da onda e, conseqüentemente, a redução de sua energia é interessante para promover proteção costeira, pois assim a energia de onda e, portanto o potencial de erosão costeira diminuiu significativamente. Além de ajudar a combater a erosão indesejada, o quebra-mar é usado para abrigar artificialmente as áreas onde serão instalados píeres, portos e marinas.

Existem basicamente dois tipos de quebra-mar: enraizado e não enraizado. As desvantagens, principalmente, são o custo e o processo de ancoragem, respectivamente. A configuração tradicional de um quebra-mar é de um talude de blocos de rochas naturais ou artificiais de concreto. Esses são quebra-mares enraizados cuja estrutura requer um solo que suporte o peso do talude. Segundo VELDEE (1983) o quebra-mar de talude se estende por toda profundidade podendo interferir no transporte de sedimentos da região. O mesmo ainda ressalta que o custo desta obra cresce com o aumento da profundidade.

Já, o quebra-mar flutuante é pouco explorado no mundo inteiro, apesar de suas vantagens. FARMER (1999) relembra que antes da Segunda Guerra Mundial muito pouca atenção foi dada aos quebra-mares flutuantes. O interesse se aumentou quando a Inglaterra usou uma obra flutuante para proteger sua costa da ação das ondas e da invasão de tropas. O quebra-mar flutuante “Bombardon”, de aço com seção transversal em formato de cruz, desempenhou bem sua função contra as invasões, mas falhou logo com a chegada de uma tempestade. Durante as três décadas seguintes o assunto entrou em declínio e só reapareceu significativamente nos anos 80 com o crescente interesse da população em usar o litoral para construção de marinas, portos e lazer.

Uma das vantagens do quebra-mar flutuante é a possibilidade de construção da estrutura no continente, ou seja construção seca, para ser transportada através de rebocadores até o local de instalação. Evita-se assim, o processo construtivo molhado a partir de flutuantes. Isso é relevante para a viabilidade econômica do projeto, pois o custo de realização e as dificuldades de execução diminuem consideravelmente. Elimina-se o custo da embarcação para transporte da mão-de-obra, as horas improdutivas devido ao traslado ao local, o custo de mecanismos de segurança adicionais devido ao trabalho embarcado, o custo do transporte do material de construção, além de reduzir despesas logísticas e técnicas construtivas. É necessária a utilização de flutuantes apenas para aprovação dos testes de mar da estrutura e para ser transportada até a posição de atuação. Um desafio é encontrar a amarração adequada para o transporte, pois esta deve resistir aos esforços de arrasto do deslocamento, corrente e garantir posição, forma e flutuabilidade da estrutura. Além disso, há mais duas vantagens na utilização dessa configuração. GIRELI (2009) afirma que o quebra- mar flutuante "[...] permite o uso de materiais não convencionais". E VELDEE (1983) lembra que um mesmo quebra-mar flutuante pode também ser usado simultaneamente como píer a sotamar, ou seja, uma obra acostável.

O material flutuante que está sendo proposto é a garrafa PET usada, uma alternativa encontrada após avaliar o uso de pneus para esse tipo de obra. O reuso de pneus inteiros para essa estrutura não é indicado na realidade brasileira onde existe a doença Dengue, cujo agente transmissor se cria em águas paradas. O clima tropical favorece o empoçamento e acúmulo de água em objetos como, por exemplo, pneus descartados. O risco maior ocorre durante a fase de coleta, armazenamento e estocagem, portanto a solução para esse material é a reutilização do pneu moído como, por exemplo, na fabricação de massa asfáltica para pavimentação. Evitando a exposição do pneu às chuvas podendo cortá-lo em unidades de borracha menores para armazenamento e estocagem.

A utilização de garrafas ainda tem uma vantagem técnica perante o pneu. No estudo referido acima, o HARMES (1982) preencheu a parte superior do pneu com espuma para garantir a flutuabilidade, caso o ar trapeado conseguisse escapar com o movimento do quebra-mar devido à variação de maré. A garrafa devido ao fato de ser fechada mantém o ar trapeado, naturalmente sem necessidade de preenchimento.

Segundo a Associação Brasileira de Indústria do PET (ABIPET) há previsão de estar disponível no Brasil por muito tempo e em grande quantidade. A retirada das garrafas do volume

de lixo é benéfica para a sociedade, o meio ambiente, e economicamente vantajoso por ser de fácil acesso e barato.

Socialmente o reuso direto de garrafas PET é bem aceito e apoiado. O fato de reutilizar material causa um impacto positivo para população. A reutilização está presente no dia-a-dia atual e novas formas de usar o material descartado são importantes.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de um quebra-mar flutuante construído a partir de garrafas PET. O principal aspecto a ser levado em consideração é a taxa de redução da altura de onda incidente à barreira em relação à onda de saída a sotamar do quebra-mar. A avaliação é feita através de um modelo reduzido confeccionado exclusivamente para esse propósito a partir de garrafas plásticas de 500ml envolvidas por uma armadura de aço, formando uma gaiola ao redor das garrafas para assegurar a forma do quebra-mar e a união dos elementos flutuantes.

Primeiramente o modelo é validado estaticamente em relação ao empuxo, à rigidez e escala para posterior submissão aos ensaios com onda. O comportamento da obra em relação à ancoragem é estudado em paralelo aos ensaios dinâmicos no canal de ondas.

Os ensaios são realizados em canal de ondas nas instalações da Fundação do Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) localizado na Universidade de São Paulo (USP). O canal, com controle de geração, garante a produção de ondas regulares de altura e de frequência pré-definidas. Tem capacidade para gerar e controlar ondas no espectro de interesse, assim como registrar as medidas das alturas de onda. As primeiras observações foram feitas com água parada, ensaio estático, que validaram a estrutura e em seguida acontece o ensaio com ondas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ONDAS DE SUPERFÍCIE EM CORPOS D'ÁGUA

As ondas observadas em corpos d'água são ondas de superfície, pois são geradas e se propagam na porção superficial da lâmina d'água. São vários os agentes causadores de perturbações que iniciam o movimento ondulatório, dentre eles podem ser listados deslizamentos de terra, abalos sísmicos, vibrações de origem antrópica, movimento de embarcações e a ação dos ventos. O principal agente causador de ondas em grandes lagos, rios, represas e oceanos são a ação do vento. A massa de ar quando se descola sobre a superfície do corpo d'água gera atrito e consegue arrastar uma porção d'água estimulando a geração da onda. (TUREKIAN, 1969)

O vento, que se caracteriza pela movimentação do ar devido a variações de pressão, sujeita a superfície da água a essas pressões e assim transfere sua energia à mesma (HOLMES, 2001). Essas turbulências do ar deformam a superfície da água de forma irregular e complexa, agitando-a tridimensionalmente. A reação ao esforço vertical impresso à superfície aquática, ou seja, a força restauradora é a força gravitacional, e, portanto as perturbações recebem o nome de ondas gravitacionais de superfície. A massa d'água sofre um deslocamento vertical positivo (para fora do centro da terra) devido a um pulso de pressão negativa do vento que cria na superfície uma elevação. A força da gravidade atrai a massa líquida para o centro da terra fazendo esta tender a retornar ao repouso, mas a inércia adquirida pela massa em movimento não permite que o repouso seja restabelecido. A massa passa pela situação de repouso e continua em direção ao centro da terra criando uma cavidade na superfície e consequentemente elevando a superfície adjacente. Quando a cavidade é formada, a superfície da água adjacente é perturbada sofrendo uma elevação. Assim se inicia o movimento senoidal da superfície, ou seja, a propagação da perturbação ou onda (SORENSEN, 2006).

Segundo FENTON (2010) o entendimento atual da geração de ondas gravitacionais de superfície é baseado nos modelos propostos por PHILLIPS (1957) e MILES (1957) em trabalhos que se complementam.

PHILLIPS (1957) defende que o escoamento turbulento do ar é um campo de pulsos de velocidades aleatórias que submete a superfície da água, inicialmente em repouso, a esforços criando uma rugosidade irregular. Essa superfície em movimento, deformada e agitada, agora

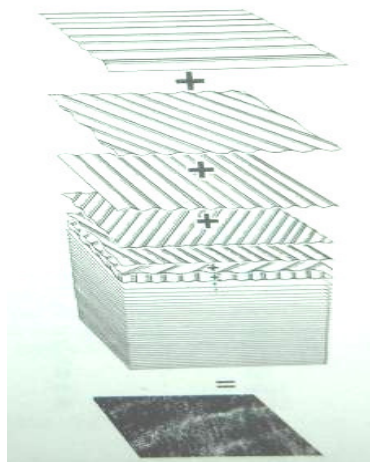
apresenta as chamadas ondas capilares. Quando a frequência (f) e o número de onda (k) das ondas capilares e das variações de pressão do ar são iguais, o sistema entra em ressonância e a amplitude da onda cresce.

Depois da fase inicial de formação de ondas capilares, o crescimento da altura de onda, segundo MILES (1957), se dá devido à formação de uma região crítica na interface ar-água. A interface já possui rugosidade e então uma segunda fase de crescimento de onda se inicia. Devido à constante modificação da superfície, a onda que atinge uma celeridade igual a velocidade do vento, forma a superfície crítica levando a um aumento no gradiente de crescimento da onda. A transferência de energia da força do vento para a água aumenta exponencialmente e conseqüentemente a altura da onda segue essa tendência em seu crescimento.

A altura da onda gerada depende de três parâmetros do vento, sendo eles a duração, a velocidade e a pista de sopro, ou *fetch*, que corresponde à distancia em linha reta sobre a massa líquida na qual o vento atua, no sentido de propagação do vento. A partir de uma razão 1:7 entre a altura e o comprimento da onda, esta atinge sua esbeltez máxima, momento em que passa a dissipar o excedente de energia transferido pelo vento, na forma de arrebenção parcial ou *whitecapping*, sendo este o fator limitante ao crescimento da onda (SORENSEN, 2006).

Na zona de geração, as perturbações causadas pelas rajadas de vento imprimem um cenário caótico, onde várias ondas são geradas e se propagam de maneira sobreposta, com diferentes celeridades e direções (Figura 1). Esta ondulação é chamada de vaga ou *sea* (USACE, 1984).

Figura 1 - Sobreposição de Ondas em Superfícies Aquáticas



Fonte: Turekian, 1969

O fim da atuação do vento em determinada onda pode ser dado pelo esgotamento da energia do sistema de pressões na zona de geração e encerramento da transferência de energia ou pelo distanciamento da onda da zona de geração. As ondas se propagam com celeridades variadas. As ondas longas de baixa frequência viajam mais rápido, e, portanto se afastam da zona de geração em menos tempo. À medida que a onda se afasta da zona de geração o cenário da superfície da água se regulariza, resultando em uma superfície ondulatória regular com ondas de longas, chamada de marulho ou *swell* (HOLMES, 2001).

O resultado do encontro de ondas tem papel importante no processo de regularização do cenário caótico da zona de geração, pois as ondas quando se encontram sofrem modificação, variando conforme o tipo da interação. O encontro pode ser brusco, quando ondas se chocam gerando turbulência e dissipando sua energia, isso acontece quando exercem função de obstáculo. Outra forma de interação é a soma que, por sua vez, pode ser positiva ou negativa e, portanto a altura da onda pode aumentar ou diminuir, respectivamente. (USACE, 1984)

Assim o encontro de ondas gera um processo de filtração e as ondas seguem seu percurso de forma organizada, pois ondas com períodos semelhantes se propagam com celeridades próximas.

A onda em águas profundas se propaga na linha do *fetch* praticamente sem alteração até que encontra outra onda ou um obstáculo. Durante a propagação acontece a dispersão, o espalhamento da energia da onda em forma de feixe, resultando na redução da altura de onda e ondas mais longas (SORENSEN, 2006). Devido à baixa dissipação de energia da onda em águas profundas essa onda pode viajar até milhares de quilômetros até encontrar a linha de costa.

3.1.1 Efeitos de águas rasas

Na teoria linear a onda gravitacional, elucidada na seção 4, de superfície pode ser classificada conforme a profundidade da água em que viaja. Segundo o Shore Protection Manual (USACE, 1984) o comprimento de onda relaciona-se com a profundidade da água conforme a Tabela 1.

Tabela 1- Classificação das ondas de gravidade conforme profundidade

Classificação	h/λ
Onda de água profunda	$> 0,5$
Onda de água intermediária	$0,5 < h < 0,05$
Onda de água rasa	$< 0,05$

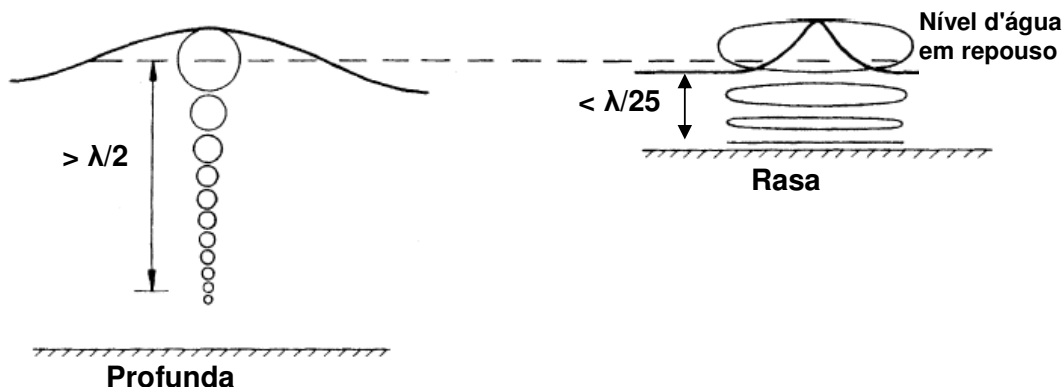
Fonte: adaptado de USACE, 1984

Os valores da tabela decorrem de observações que envolvem a observação do movimento das partículas da água em uma onda. O movimento orbital descrito por uma partícula na superfície da água é aproximadamente circular. As partículas pertencentes à massa mais profunda descrevem raios cada vez menores e o raio se aproxima de zero conforme a profundidade se torna-se superior à metade do comprimento da onda (SORENSEN, 2006). Segundo MASSEL (1996) águas profundas são aquelas onde a profundidade é tal que a presença do fundo pode ser desconsiderada.

Quando não há profundidade suficiente para a execução do movimento completo das partículas, a região é chamada de água intermediária. Neste caso $0,05\lambda < h < 0,5\lambda$ e a presença do fundo interfere no movimento orbital da partícula achatando o movimento circular das órbitas e transformando o movimento em elipses (Figura 2). Trata-se de água rasa quando a partícula da superfície não consegue realizar movimento circular, portanto $h < 0,05\lambda$ e nessa região as ondas recebem nome de ondas de água rasa (SORENSEN, 2006).

Corpos d'água com profundidades intermediárias ou rasas são aqueles cujo fundo interfere no movimento orbital das partículas, causando, conseqüentemente, mudanças na onda que levam à dissipação de energia. Uma breve descrição dos efeitos de águas rasas, a difração, a refração, a arrebentação, a reflexão e o empolamento, será feita na seqüência, sendo o último o efeito relevante para neste trabalho, pois está diretamente relacionado com o ensaio dinâmico realizado.

Figura 2 - Efeito de água rasa no movimento orbital das partículas



Fonte: adaptado de SORENSEN, 2006

3.1.1.1 Difração

Segundo SORENSEN (2006) a difração da onda de gravidade é análoga à difração da luz. A difração de ondas consiste no desvio do percurso normal devido a alguma barreira física e a conseqüente transferência de energia em um ângulo, diferente se seu percurso retilíneo. A difração resulta do encontro das ondas com obstáculos tais como ilhas, rochas emergentes, e obras costeiras.

3.1.1.2 Refração

Quando as ondas chegam a profundidades menores com rumo diferente do ortogonal em relação à linha de costa elas sofrem interferência do fundo de forma irregular, pois parte da extensão da onda atinge águas rasas instantes antes do restante. Esse é o principal motivo pelo surgimento da refração da onda, ou seja, a mudança de direção da onda. A frente de ondas gira, pois a onda é desacelerada de forma desigual e atinge a linha de costa com ângulo próximo à perpendicularidade (HOLMES, 2001).

3.1.1.3 Arrebentação

A arrebentação acontece no instante seguinte ao da onda atingir sua esbeltez máxima, pois a onda é freada pelo fundo e devido ao fato de estar extremamente esbelta a onda está

fisicamente instável. A crista da onda, que não sofre tanto atrito do fundo, segue o movimento devido à inércia, enquanto a massa de água da crista que arrebenta é projetada para frente na direção da celeridade da onda. A massa da crista projetada no sentido de propagação da onda descreve uma parábola e se mistura com a base da onda causando grande turbulência e dissipação de energia. (DEAN e DALRYMPLE, 1984)

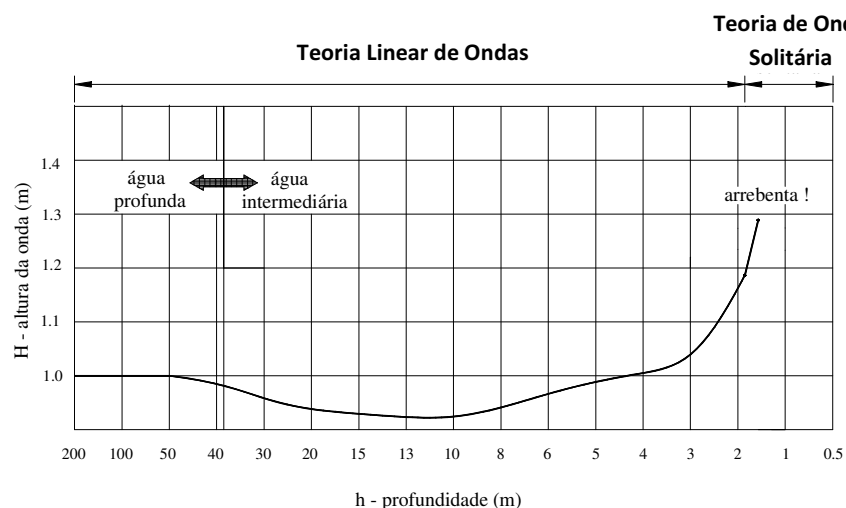
3.1.1.4 Reflexão

SOERENSEN (2006) explica que em águas rasas cujo fundo não é horizontal parte da energia da onda é refletida. A porção refletida é pequena e em geral pode ser desconsiderada, porém em praias muito inclinadas ou formações verticais submersas há reflexão de parte da energia é considerável.

3.1.1.5 Empolamento

A diminuição de profundidade (h) causa empolamento da onda, ou seja, a variação da densidade de energia da onda. No primeiro momento, em águas intermediárias o atrito com o fundo é o efeito preponderante do empolamento fazendo com que a altura de onda decresça, pois parte da energia da onda é dissipada pelo atrito com o fundo. Como a celeridade da onda é proporcional ao tirante de água existente no local onde ela está se propagando, conforme a profundidade da água diminui a parte mais avançada da frente de onda freia antes da parte posterior da onda, levando ao encurtamento da onda. Essa redução na área da onda leva a um aumento na densidade de energia, assim a massa líquida reage, aumentando a altura da onda, para redistribuir sua energia. Após a entrada da onda em águas intermediárias, o efeito de dissipação de energia é mais efetivo que a frenagem, fazendo com que a onda perca altura no primeiro momento, entretanto, conforme a profundidade diminui mais, frenagem redução de área passa a prevalecer, fazendo com que a onda volte a ganhar altura até sua arrebentação (ALFREDINI, 2009). A Figura 3 mostra esse processo.

Figura 3 - Gráfico de empolamento



Fonte: adaptado de ALFREDINI, 2009

O conhecimento do mecanismo de empolamento do escoamento em termos quantitativos é importante para a engenharia costeira. O consagrado Shore Protection Manual (USACE, 1984) publica a expressão matemática que representa o empolamento, Equação (1).

$$K_s = \frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1}{\tanh kh \left(1 + \frac{2kh}{\sinh kh} \right)}} \quad (1)$$

Onde

K_s : fator de empolamento;

H_0 : altura da onda em água profunda;

H: altura da onda;

k: número de onda;

h: profundidade da água.

3.1.2 Geração de Ondas

A modelagem física é uma ferramenta muito importante e utilizada para conhecer melhor o comportamento da obra antes de ser implantada. A geração de ondas em canais evoluiu ao longo dos últimos 50 anos e hoje existem equipamentos que simulam ondas regulares e irregulares reproduzindo a natureza em laboratório (SORENSEN, 2006). Apesar desse avanço

dos equipamentos de geração de onda disponíveis hoje, ondas regulares ainda são muito utilizadas para avaliar obras costeiras, pois afinal o *swell* que atinge a linha de costa tem característica próxima da regularidade (GIRELI, 2008).

SORENSEN (2006) ressalta que é comum fazer uso de uma onda de projeto com altura (H) e período (T) para o dimensionamento de obras costeiras. Os valores adequados para a onda de projeto são encontrados fazendo uso, tanto de séries históricas quanto de modelos matemáticos e estatísticos que direcionam a definição da altura e do período de projeto para a simulação.

Para estudar as ondas e seus efeitos em simulações com modelos físicos reduzidos são usados canais ou tanques de onda. São instalações de dimensões variadas que possuem sistemas de geração e controle de ondas. São basicamente três elementos que compõem uma instalação de simulação de onda, o canal ou tanque, o batedor de onda e o sistema de controle de geração.

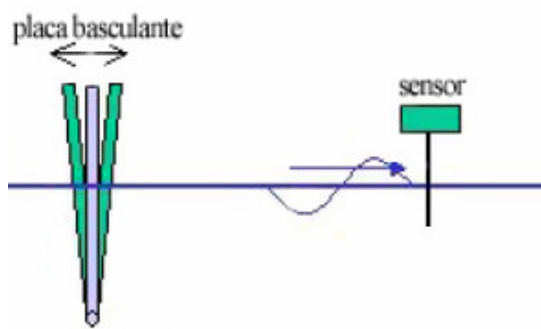
O canal ou tanque, o corpo d'água da instalação, tem dimensões conforme a necessidade baseada na utilização prevista e da disponibilidade de espaço. O sistema de controle é composto pela instrumentação e programação que intermedia a entrada de dados e a geração da onda desejada.

Segundo CERDEIRA (2006) a decisão sobre a finalidade do tanque ou canal é primordial para a definição de sua geometria. Os canais destinados a estudos navais e oceânicos devem ter profundidade maior e é interessante que não haja nenhum tipo de reflexão nas paredes. Já um canal para estudos costeiros, a reflexão na praia do canal deve ser considerada pois é um fenômeno presente em campo. O comprimento do canal deve ser o maior possível para garantir tempo à coleta de dados e permitir que a onda seja absorvida a sotamar do canal.

O batedor de onda é o equipamento responsável por fazer a onda fisicamente, forçando a massa de água a se deslocar através da aplicação de energia cinética. Existem diversos tipos de batedores dentre eles basculante ou pivotante, pistão hidráulico e o pistão mecânico, cunha, pneumático ou até misto como o canal do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) que pode ser operado como pivotante ou de pistão.

O batedor basculante ou pivotante funciona com um eixo e uma placa que gira em torno deste eixo deslocando com o movimento basculante, ou pivotante, a massa d'água conforme ilustrado na Figura 4.

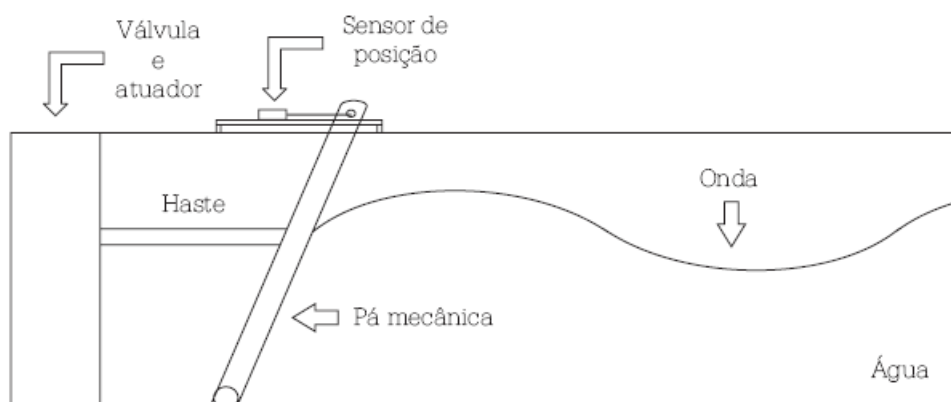
Figura 4 - Batedor pivotante



Fonte: Michima, 2007

O batedor de pistão, esquematizado na Figura 5, seja ele hidráulico ou mecânico, descola a massa d'água horizontalmente. O pistão imprime uma força horizontal à placa do batedor que transfere o movimento para a água, a pá ou placa pode ser vertical ou inclinada. O batedor usado para os ensaios deste trabalho é pistão mecânico e será discutido especificamente com mais detalhe na seção 4 (Materiais e Métodos).

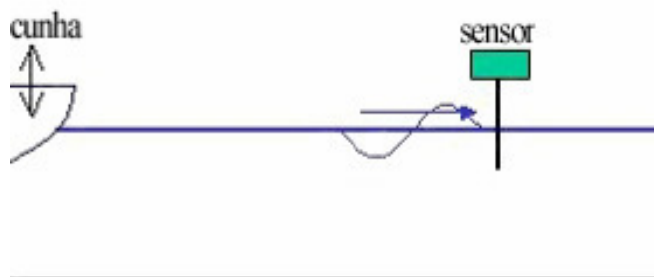
Figura 5 - Batedor de pistão



Fonte: Vilaça, 2005

O batedor tipo cunha, ilustrado na Figura 6, consiste em uma cunha que se movimenta verticalmente e devido ao seu formato cuneiforme desloca a água horizontalmente por camadas, ou seja conforme a cunha penetra a lâmina d'água as camadas superiores recebem a transferência de energia antes da camada seguinte e assim por diante.

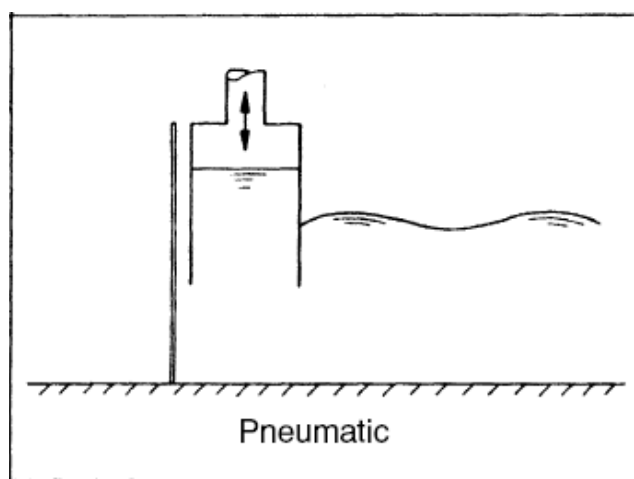
Figura 6 - Batedor tipo Cunha



Fonte: Michima, 2007

O batedor do tipo pneumático gera a onda através de um dispositivo gerador de pressão negativa que atrai massa de água e a libera gerando o pulso no fluido para a geração de onda. Este tipo de gerador de onda está representado na Figura 7.

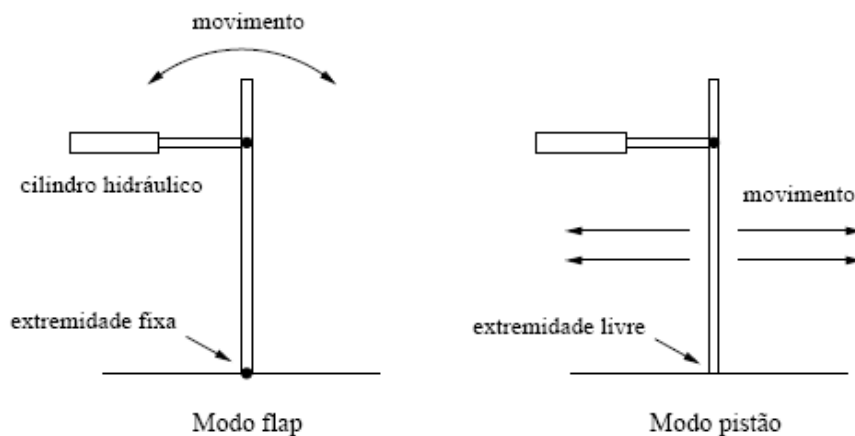
Figura 7 - Batedor tipo pneumático



Fonte: adaptado de SORENSEN, 1993

Um exemplo de canal misto é o da COPPE representado na Figura 8. Para se alternar entre as duas maneiras de funcionar o canal modifica-se a posição de algumas partes mecânicas do sistema, sem necessidade de esvaziar o canal.

Figura 8 - Canal misto da COPPE



Fonte: Vilaça, 2005

3.2 QUEBRA-MAR

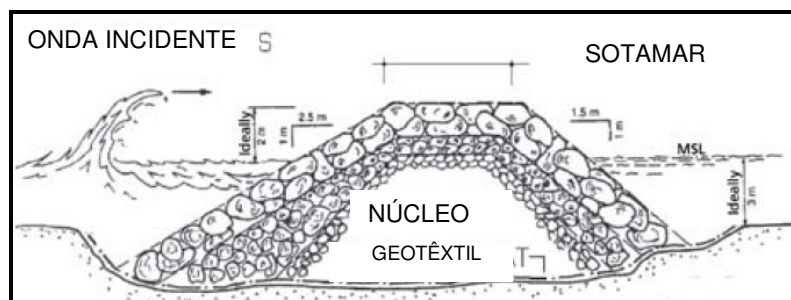
O quebra-mar é um elemento da engenharia marítima caracterizado como obra de abrigo. A importância das obras de abrigo é criar áreas protegidas de ondas e correntes, seja para poupar a linha de costa da ação das ondas ou para a criação de bacia portuária. Existem vários tipos de estruturas que promovem abrigo. Os quebra-mares por sua vez protegem de ondas, pois funcionam como um obstáculo existente no percurso da onda. ALFREDINI (2009) diferencia as obras de abrigo em convencional e não-convencional, conforme sua aplicação em obras de maior e menor porte, respectivamente.

3.2.1 Obra Convencional

São obras fixas de materiais convencionais como concreto, areia, pedra podendo ser armada. A Figura 9 e a Figura 10 mostram as duas configurações mais comuns para quebra-mares enraizados.

O quebra-mar de talude é a configuração tradicional e mais usada normalmente, sendo geralmente composto por blocos de enrocamento ou concreto (GIRELI, 2010).

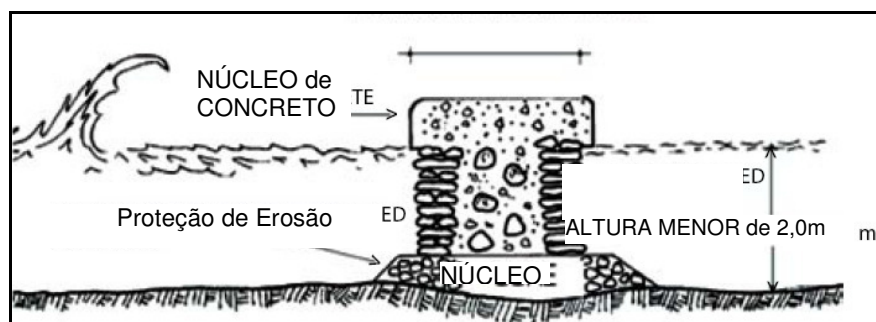
Figura 9 - Quebra-mar de talude



Fonte: adaptado de SCIORTINO, 2010

O quebra-mar de parede vertical também é uma obra convencional e age refletindo grande parte da energia da onda. Essa tipo obra não é recomendada para solos moles e segundo GIRELI (2009) requer processo construtivo complexo.

Figura 10 - Quebra-mar de parede vertical

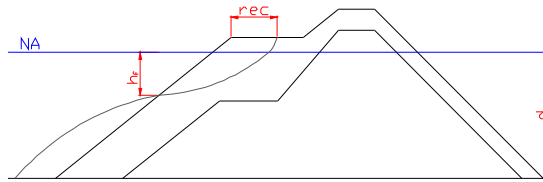


Fonte: adaptado de SCIORTINO, 2010

Obras mistas, combinando os dois tipos anteriormente citados, também são soluções encontradas, como por exemplo, um talude com uma parede vertical em sua crista para solos com menor capacidade de suporte.

Convém listar mais duas configurações de quebra-mares fixos e enraizados, sendo essas o quebra-mar de berma e recifes artificiais. O quebra-mar de berma, Figura 11, é uma variação do de talude contando com bermas para otimização do tamanho dos blocos e seu formato propicia a maior dissipação de energia.

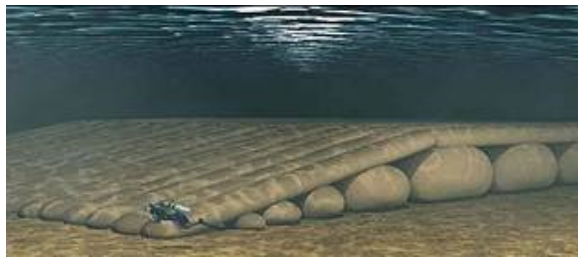
Figura 11 - Quebra-mar de berma



Fonte: GIRELI, 2009

Os recifes artificiais, conforme Figura 12, são obras submersas que não emergem e agem na onda causando sua arrebentação e assim possibilitam a perda de energia e altura de onda.

Figura 12 - Recife artificial



Fonte: Por Dentro das Ondas

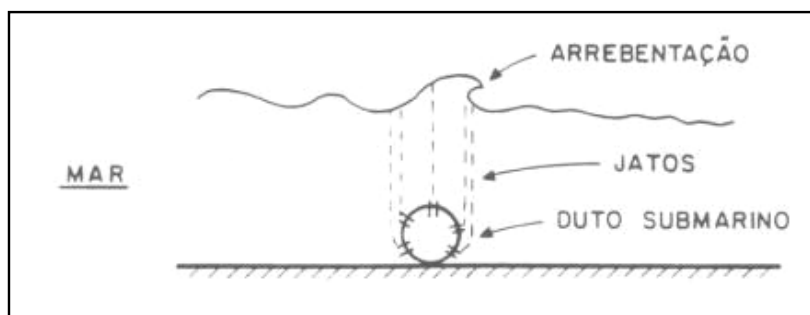
A geometria de quebra-mares convencionais é definida principalmente pela composição do solo e sua capacidade de suporte. Dependendo do resultado das sondagens e perfilagens, pode ser necessário o uso de geotêxteis para preparar o terreno para receber a obra (SCIORTINO, 2010).

3.2.2 Obra Não-Convencional

ALFREDINI (2009) explica que esse grupo abrange o quebra-mar do tipo pneumático, hidráulico ou flutuante. São projetos que causam a redução de altura de onda sem a implantação de uma obra fixa. Esses quebra-mares não exigem a condição de continuidade, pois podem ser instalados sem ligação com a linha de costa ou outra estrutura portuária. Dentre as obras não convencionais encontram-se os quebra-mares flutuantes, pneumáticos e hidráulicos. O princípio de funcionamento do quebra-mar hidráulico e pneumático é semelhante. Ambos consistem em jatos de fluido lançados a partir de uma tubulação submersa, no local em que se deseja criar o

obstáculo à onda. A tubulação é apoiada no fundo e direciona a vazão de fluido verticalmente. Isso gera uma cortina de ar ou água formando a barreira. Esse tipo de obra garante sua eficiência devido a dois efeitos que causa no escoamento. A combinação do efeito degrau e a barreira física que a massa de água encontra e enfrenta, perdendo energia por reflexão e na turbulência com o escoamento vertical. O efeito degrau reduz a profundidade bruscamente levando ao encurtamento da onda e conseqüentemente a elevação da esbeltez levam à arrebentação dissipando assim grande parte de sua energia. A ilustração da Figura 13 demonstra o mecanismo.

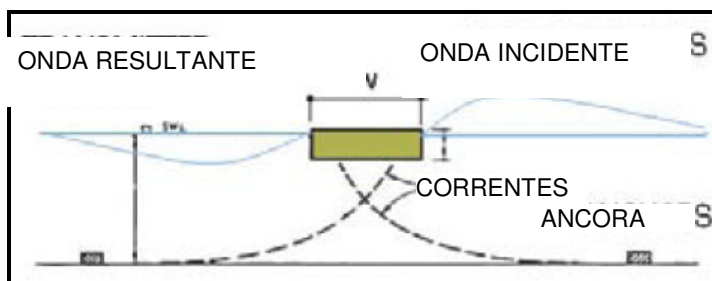
Figura 13 - Quebra-mar hidráulico ou pneumático



Fonte: adaptada de ALFREDINI (2009)

A obra discutida nesse trabalho é o quebra-mar flutuante que recebe esse nome por flutuar enquanto não estiver instalado. Esse conceito tem inúmeras vantagens sobre os demais tipos de obras de abrigo. O funcionamento dessa estrutura modular é descontínuo, pois dispensa a ligação com obras fixas, conforme apresentado na Figura 14.

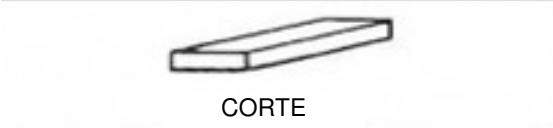
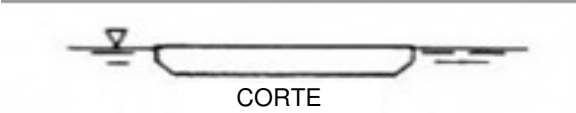

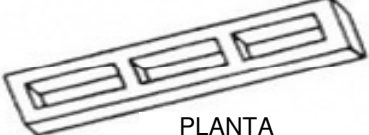
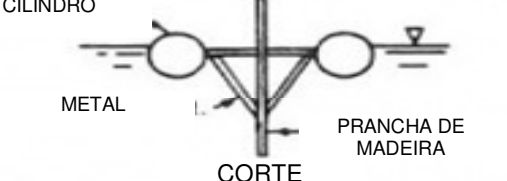
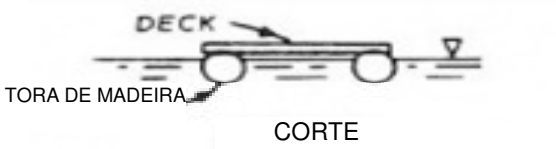
Figura 14 - Quebra-mar flutuante



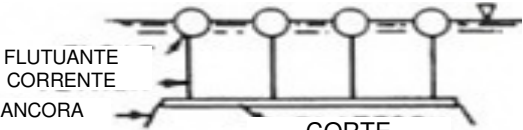
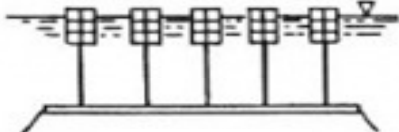


Fonte: adaptado de SCIORTINO, 2010

Os diversos tipos de quebra-mares flutuantes estão representados na Tabela 2 que serão discutidos individualmente.

Tabela 2 - Tipos de quebra-mares flutuantes

Tipo de quebra-mar flutuante	Imagem	Descrição
<p><u>Caixa</u></p> <p>Retângulo Sólido</p> <p>Barca</p>	 <p>CORTE</p>  <p>CORTE</p>	<p>Unidades de concreto reforçado e podem ser ocas ou preenchidas com material leve</p>
<p><u>Flutuador</u></p> <p>Flutuador Duplo</p>	 <p>DECK</p> <p>FLUTUANTE LASTRO</p> <p>CORTE</p>	<p>Semelhante a um catamarã</p>
<p>Compartimento Vazado</p>	 <p>PLANTA</p>	<p>Chamado também de tipo Alaska</p>
<p>Moldura A</p>	 <p>CILINDRO</p> <p>METAL</p> <p>PRANCHA DE MADEIRA</p> <p>CORTE</p>	
<p>Tora Dupla</p>	 <p>DECK</p> <p>TORA DE MADEIRA</p> <p>CORTE</p>	<p>A plataforma superior é um esquadro aberto de madeira</p> <p><i>Continua...</i></p>

Tipo de quebra-mar flutuante	Imagem	Descrição
Estreita de pneus	 CORTE	
Esteira de toras	 PLANTA	Jangada de toras amarradas ou acorrentadas
<u>Bóia</u>		
Esferas	 FLUTUANTE CORRENTE ANCORA CORTE	Bóias enfileiradas
Pneus	 CORTE	Arranjo semelhante ao de esferas. Ao invés de pneus podem ser usadas latas com lastro.

Fonte: adaptado de COASTALWIKI, 2011

Conforme BRADLEY (1998) a grande diferença entre os quebra-mares apresentados é sua geometria e consequentemente a forma de transferência de energia da onda incidente sobre a estrutura.

Os conceitos da Tabela 2 resumem-se em quatro categorias:

- quebra-mar retangular

A estrutura pode ser tanto uma caixa fechada como pode ser um elemento vazado, mas a face de impacto da onda é uma parede vertical.

O material usado é, em geral, concreto ou aço.

A redução de energia da onda incidente no quebra-mar retangular acontece por reflexão, pois a onda encontra a face uniforme em seu percurso e é forçada a voltar.

- quebra-mar metálico

A estrutura metálica é esbelta e também funciona reduzindo a energia da onda incidente por reflexão, pois a onda encontra a face uniforme em seu percurso e é forçada a voltar.

- quebra-mar tipo esteira

Esse tipo de obra permite o uso de materiais flutuantes não convencionais, como pneus, plástico, borracha e poliestireno expandido, e costuma ser modular. O colchão não é impermeável permitindo que a água passe pelos elementos flutuantes. A redução da energia acontece através de três fenômenos. Por reflexão, pois a onda atinge a face do colchão e parte da energia é refletida. Por dissipação em forma de atrito devido à turbulência causada nos vazios entre os elementos flutuantes. Por transferência de energia do empuxo pelo cabo de ancoragem para o solo.

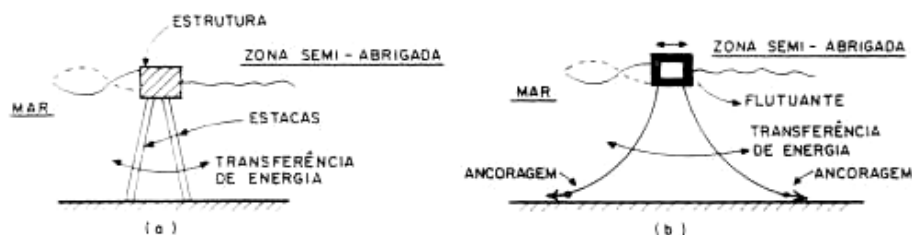
- quebra-mar tipo bóia

Os elementos flutuantes são ancorados ao fundo do corpo d'água individualmente e o conceito utilizado é a transferência de energia. Segundo GIRELI (2009) o material flutuante pode ser não convencional como pneus, plástico, borracha e poliestireno expandido.

3.2.2.1 Quebra-mar Flutuante Tipo Esteira

A obra discutida nesse trabalho se enquadra no conceito de quebra-mar flutuante tipo esteira. A Figura 15 mostra dois tipos de quebra-mares flutuantes: (a) estaqueado (b) ancorado. A configuração estaqueada confere uma menor mobilidade à obra quanto à mudanças de orientação, local ou manutenção. Por outro lado, pode ser uma solução para pequenas profundidades com grandes correntes e ondas, pois é uma obra fixa, porém não ocupa toda profundidade.

Figura 15 - Quebra-mar flutuante tipo esteira



Fonte: adaptado de ALFREDINI, 2009

Já a configuração ancorada apresenta como vantagem poder ser construída em terra e rebocada até a posição onde será empregada. Além disso a obra é móvel e pode ser retirada e reinstalada sem destruição.

Uma sugestão de FARMER (1999) é deixar o sistema de ancoragem no local e mover somente o flutuante quando necessário. Essa ideia é uma opção para realização de manutenção no quebra-mar em terra sem precisar trabalhar a partir de barcos ou com mergulhadores.

Em grandes profundidades uma obra que não ocupa toda coluna d'água requer significativamente menos material pois ocupa a linha d'água somente parcialmente. Um sistema de ancoragem, mesmo sendo de grande comprimento, é menos custo que um talude de grande altura. O custo de um quebra-mar flutuante de esteira, principalmente quando construído a partir de material reutilizado, é menor que o de um de talude que requer fundação, núcleo estrutural e por fim a área de ataque.

A bibliografia sobre quebra-mares flutuantes é escassa e os autores consultados relatam experiências de quebra-mares feitos a partir de diversos materiais, como caixões de concreto, madeira, e pneus.

HARMES (1982) ensaiou um quebra-mar conceituado a partir de um arranjo de pneus nos Estados Unidos nos anos 80. Esse ensaio foi o ponto de partida para a ideia inicial deste trabalho. Após avaliar o trabalho mencionado foi identificado que um resultado semelhante poderia ser esperado usando como matéria prima a garrafa PET. Ambos os materiais representam grande poluição do meio ambiente porque são usados em larga escala por diversos segmentos e atividades. São de decomposição lenta, portanto geram grandes volumes de lixo. Reutilizando garrafas diretamente na construção civil grande volume de lixo doméstico é eliminado apoiando o meio ambiente.

Os primeiros documentos que registram o interesse pelo estudo de quebra-mar flutuante datam de 1811 da Inglaterra. O General Bentham da Marinha da Grã-Bretanha o construiu com 117 molduras triangulares flutuantes de madeira cada uma com as medidas 18,3m por 9,20m por 9,20m, ancoradas com correntes de aço (BRADLEY, 1998).

Desde então a comunidade científica vem ensaiando timidamente quebra-mares flutuantes. As vantagens construtivas e o baixo custo geram a curiosidade e a motivação necessária para garantirem a continuação da pesquisa do assunto ao longo de anos, porém incertezas desencorajam a aplicação prática.

As referências consultadas mencionam o quebra-mar flutuante como uma obra ainda pouco estudada e explorada. Ele recebe atenção em livros da área da hidráulica marítima, mas normalmente é encontrado em capítulos curtos. Se faz menção ao potencial de pesquisa que esse tipo de estrutura ainda oferece. Diversas fontes consultadas como, por exemplo, BRUUN (1993), ENGENHARIA CIVIL NA INTERNET (2011) explicitam a necessidade de aprofundar estudos referentes ao quebra-mar flutuante e QUINN (1972) comenta um ensaio dos anos 50 e se refere à obra como limitada devido movimento horizontal causado pela onda incidente.

BRUUN (1993) relata que o quebra-mar permite atenuar as condições naturais das águas para possibilitar a atracação, carregamento e descarregamento de embarcações grandes e modernas, por exemplo, do tipo *roll-on roll-off* e graneleiros. É de grande importância logística com consequências notáveis para o desenvolvimento da economia e da sociedade por expandir as operações portuárias. Para o sucesso de uma obra, seu projeto, dimensionamento e instalação levam em conta os ventos, ondas, batimetria, clima, correntes e transporte de sedimentos do local. O autor relata que encontrou redução de altura de onda em um quebra-mar flutuante de "colchão de plástico" preenchido por água de 20% para $\lambda/L = 0,2$, ou seja, o comprimento da estrutura 5 vezes o comprimento da onda.

Os diversos tipos de quebra-mares flutuantes que surgiram ao longo dos 200 anos de pesquisa foram fabricados de variados materiais, como madeira, concreto, aço, pneus e plásticos. A forma e a estrutura também foi testada, prisma triangular, prisma retangular, cruz prismática, oco, maciço, treliçado, agrupamentos.

Os pesquisadores visam reduzir a altura de onda seja por transmissão (para a ancoragem), reflexão ou dissipação ou uma combinação destas. As diversas configurações mencionadas acima divergem quanto ao tipo de fenômeno de atuação principal. A proposta do quebra-mar construído

a partir de garrafas PET dissipa a energia da onda principalmente por percolação e atrito e assim tem como fenômeno atuante principal a dissipação.

Todas as referências encontradas relacionam a eficiência do quebra-mar flutuante como dependente da relação comprimento de onda e comprimento da estrutura (dimensão longitudinal à onda); λ/L . Qualquer que seja a configuração e o material utilizado o desafio é encontrar o comprimento que garante melhor desempenho da estrutura para a onda de projeto.

WERNER (1988) reuniu em seu trabalho alguns aspectos do quebra-mar flutuante e na opinião deste autor o quebra-mar flutuante é uma opção para pequenos terminais. Esse tipo de obra tem vantagens como ser menos custoso, mais flexível e independente de profundidade e demonstrou-se ser eficiente na redução da altura de ondulação causada por embarcações. A manutenção mostrou ser mínima, sendo que a maior preocupação é com corrosão da ancoragem ou aço de construção utilizado na maioria das concepções. Outros pontos de atenção são as juntas dos módulos, pois a maioria dos quebra-mares flutuantes é confeccionada em módulos que devem ser unidos para atingir a extensão desejada. WERNER (1988) conclui que está comprovado que esse tipo de obra é aplicável a um ambiente de ondas de altura 1,2 m e período 4 s com profundidades de até 25 m. O tempo de retorno das estruturas revisadas por ele é de 30 a 50 anos, mas devido à presença de aço na estrutura ou ancoragem, requer manutenção a cada 5 a 15 anos.

3.3 O USO DA GARRAFA PET

O polietileno é um plástico de longa durabilidade mesmo quando exposto à intempéries e condições severas. Em ambiente marinho, a garrafa PET leva mais de 100 anos para se decompor (ABIPET 2011), ou seja, tem longa durabilidade.

O uso de garrafas PET para estruturas flutuantes, como está sendo proposto neste trabalho, já existe. Cada vez mais aparecem píeres cujos elementos flutuantes são as garrafas reutilizadas, por exemplo, no caso do Naga Cable Park Jaguariúna: "Utilizamos em nossa passarela mais de 80 mil garrafas PET e participamos do programa municipal de coleta seletiva de lixo" e um restaurante flutuante no Canadá: "Uma sala de jantar exclusiva que flutua graças a 1,7 mil garrafas PET." (REVISTA ÉPOCA, 2010). Diferentemente dos exemplos apresentados, o desafio deste trabalho é analisar o funcionamento do quebra-mar, a capacidade dissipativa no teste de amortização de altura de onda quando mantidas submersas.

Apesar do nome deste tipo de obra ser quebra-mar flutuante, este não deve flutuar livremente na água. O quebra-mar deve deslocar um volume d'água de forma que os elementos flutuantes estejam constantemente solicitados por empuxo. Assim o quebra-mar passa a ser um obstáculo no percurso da onda. Este empuxo é gerado conforme a tensão nos cabos de ancoragem aumenta e o quebra-mar é imerso.

A garrafa PET é largamente utilizada no Brasil, principalmente pela indústria de bebidas. Por ser de difícil decomposição, seu descarte gera grandes volumes de lixo e impacto negativo ao meio ambiente. Dados da Associação Brasileira da Indústria do PET de 2010 mostram a grandeza do material na rotina do país. Em 2009 foram consumidos um total de 520.000 toneladas de resina, dos quais 75% foram usados para a fabricação de garrafas. O total gerou um faturamento anual de R\$ 3,38 bilhões e empregou 40.000 pessoas. Além disso, 800.000 pessoas trabalharam na coleta e separação do material no lixo doméstico. O Politereftalato de Etileno popularmente conhecido como PET tem as características apresentadas na Tabela 3 segundo o Boletim Técnico do PORTAL DO PET (2011):

Tabela 3 - Características PET

Propriedades do PET
Massa Específica: 1270 kg/m ³
Resistência ao Impacto: 2200 J/m ²
Resistência a Baixa Temperatura: -50 °C
Ponto de Fusão: 240 °C a 280 °C
Ponto de amolecimento: 110 ° a 120 °C
Boa resistência mecânica térmica e química
Boas propriedades de barreira: absorção de oxigênio é de 10 a 20 vezes menor que nos plásticos "commodities"
Fácil reciclabilidade.

Fonte: adaptado de PORTAL DO PET (2009)

A ABIPET forneceu dados sobre a massa média das pré-formas que dão origem às garrafas, sendo de aproximadamente 50 g.

O PET tem resistência às intempéries e sol e, portanto espera-se que a durabilidade do material para esse projeto seja boa, pois a decomposição no ambiente marinho é de mais de 100 anos (INMETRO e IDEC, 2002). Portanto não há preocupação com a durabilidade da principal matéria prima da estrutura em relação ao tempo de retorno da obra.

Dos casos estudados, 3 serão elucidados, considerados principais para o dimensionamento e concepção do quebra-mar que está sendo proposto.

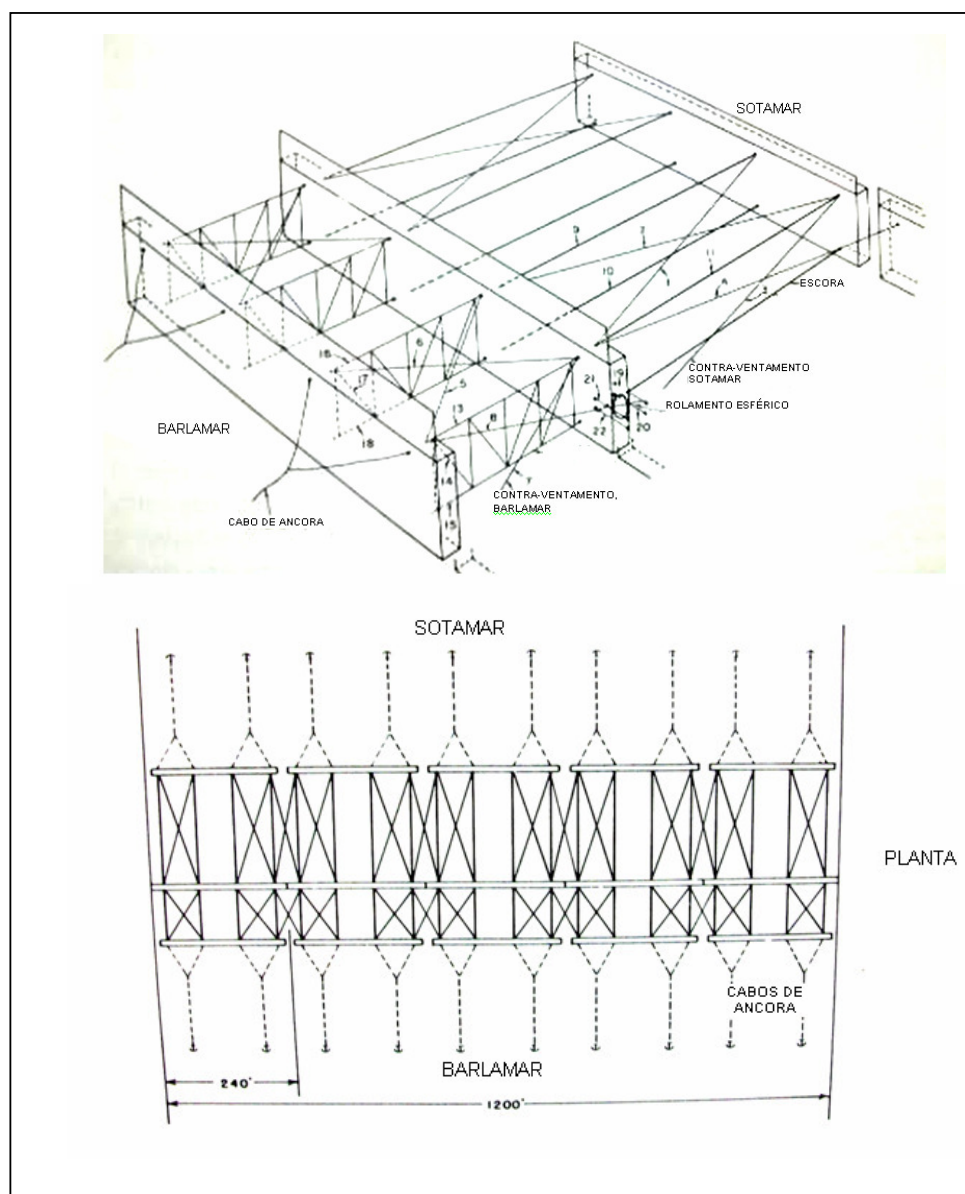
3.4 ESTUDO DE CASO 1

QUINN (1972) menciona em seu livro o ensaio de 1952 na Califórnia e obteve um resultado que condiz com os demais textos consultados.

Um quebra-mar de aço consistiu em 5 seções de 72 metros, totalizando 360 m de extensão total em águas de 12,3 a 15,9 m, teve eficiência da ordem de 75 a 90% em ondas cujo período (T) era menor que 8,5s. O parâmetro que comanda a eficiência do projeto é a relação comprimento de onda e comprimento do quebra-mar (λ/L). Nesse ensaio o autor também obteve uma resposta sobre a ancoragem e observou que as tensões nos cabos foram maiores que as esperadas, superando a tensão de projeto. A tensão em cada corrente superou 900.000 N (90 tf), portanto a ancoragem foi identificada como principal complicação da concepção. O quebra-mar tinha tendência de se movimentar verticalmente com a passagem da onda e longitudinalmente juntamente com o sentido da onda. Nessa montagem cada módulo tinha 2 pontos de ancoragem a barlar e 2 a sotamar. Esse projeto foi avaliado pelo autor como sendo de baixo custo e interessante para proteção temporária, seja para abrigo provisório de um porto ou estuário para construção ou um artifício para possibilitar manuseio de carga de embarcações em condições adversas extremas de mar.

A Figura 16 apresenta o arranjo da estrutura empregada por QUINN (1972).

Figura 16 - Arranjo do quebra-mar de aço ensaiado pelo Beach Erosion Board nos EUA nos anos 50



Fonte: adaptado de QUINN, 1972

3.5 ESTUDO DE CASO 2

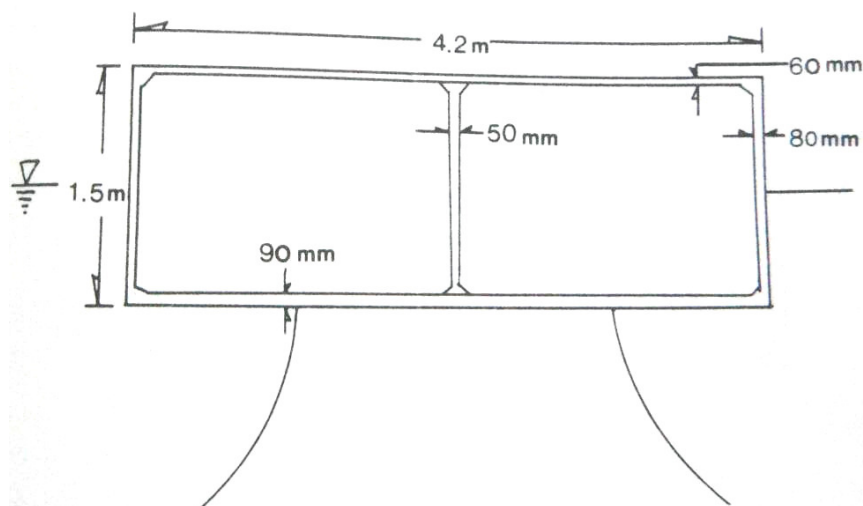
VELDEE (1983) em sua pesquisa ensaiou um quebra-mar de concreto tipo viga caixão e também avaliou as tensões na ancoragem. De forma otimista o autor explicita suas observações e ressalta que o quebra-mar flutuante ainda tem mais potencial a ser explorado. Ele indica, através

da sua pesquisa, que o efeito de escala em modelos reduzidos é mínimo quando comparou resultados de modelagem física reduzida com objetos ensaiados em escala real.

Sobre a ancoragem fica claro que o uso de correntes de aço é a técnica mais difundida nessa obra. O modelo em estudo contava com dois pontos de ancoragem com correntes de 15m cada.

O protótipo de concreto em formato retangular era oco e não foram adicionados materiais flutuantes ao quebra-mar de 4,2 m de largura, 1,5 m de altura, conforme a Figura 17 e extensão transversal à frente de ondas de 30 m, 10 módulos de 3 m.

Figura 17 - Corte do módulo elaborado por VELDEE



Fonte: VELDEE, 1983

Em relação ao movimento do quebra-mar quando submetido a ondas de período curto, este se mostrou quase parado, ao contrário de seu comportamento sujeito a ondas de períodos maiores. VELDEE (1983) compara a relação onda resultante e onda incidente com ondas de períodos longos e obteve que a onda resultante varia de 20 a 30% da onda incidente quando λ é $2,5 \times L$, um resultado que se destaca em relação a outras configurações de quebra-mar, em termos de redução de onda.

Ressalta-se que o quebra-mar tipo viga caixão é custoso, de material convencional não ecológico e a ancoragem é crítica, pois a redução da altura de onda nessa concepção de quebra-

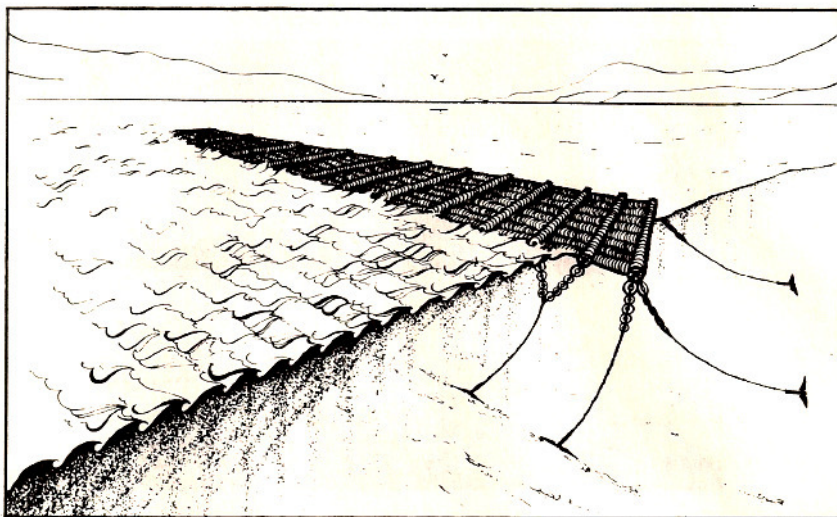
mar é conseguida através de reflexão. Este trabalho também condiz com a linha de observações dos demais trabalhos analisados.

3.6 ESTUDO DE CASO 3

Este estudo de caso foi o ponto de partida para esta pesquisa. O artigo publicado em 1982 se refere ao ensaio do quebra-mar flutuante de pneus realizado em Fort Belvoir nos EUA pela Universidade Estadual de Nova Iorque em Buffalo (SUNY) em parceria com o US Army Coastal Engineering Research Center (CERC).

HARMS (1982) ensaiou um quebra-mar composto por pneus, tubos, retentor de pneus, cintas, rebites para fixação e espuma. Foram testados 2 módulos representados na Figura 18, o primeiro denominado PT-1 de pneus de caminhão e o segundo com PT-2 de pneus de carro.

Figura 18 - Desenho esquemático da instalação do quebra-mar tipo PT

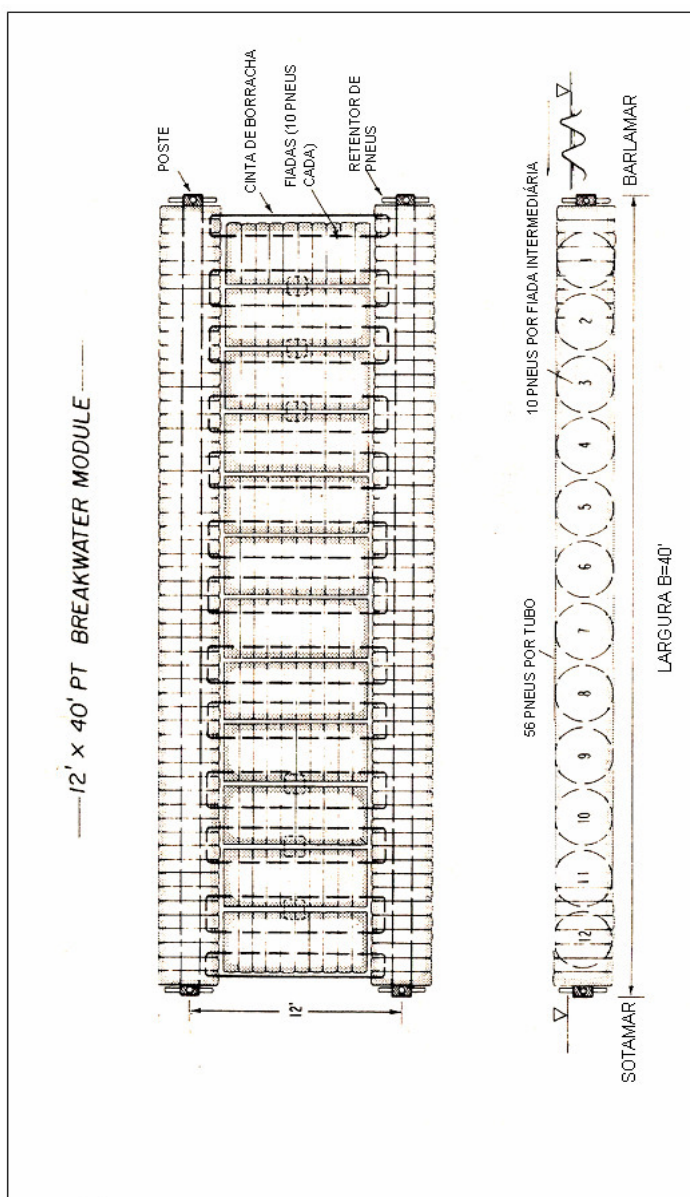


Fonte: HARMS, 1982

O foco do estudo foi no módulo PT-1, que possui 12,2 m de comprimento e 3,7 m de largura sendo composto por 176 pneus, 49 em cada tubo de aço e 12 fiadas intermediárias com 10 pneus cada, conforme Figura 19 e Figura 20. Os módulos são projetados para formarem um grande quebra-mar enfileirando-os na transversal. A estrutura completa possui um comprimento de 12,2 m, extensão de $3,7 \times N$ metros e uma massa de aproximadamente $10.000 \times N$ kg, sendo N

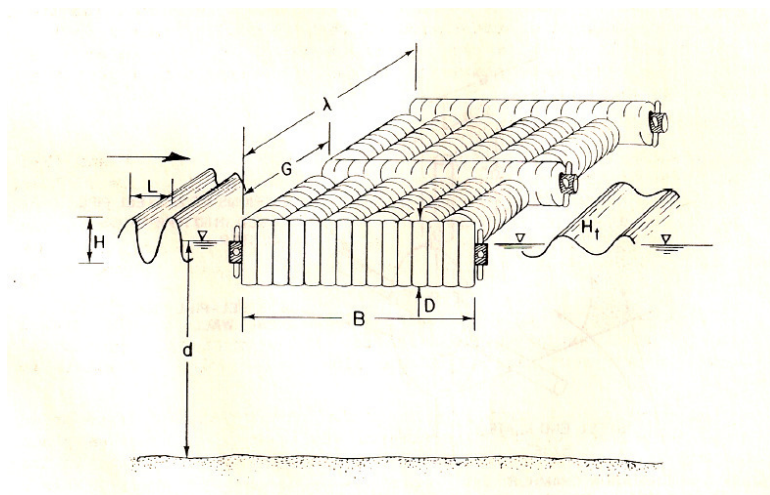
o número de módulos encadeados. Os materiais utilizados para a construção do PT-1 foram: pneus de caminhão ($\varnothing=1,02$ m), tubo de aço ($\varnothing=0,41$ m e espessura= 0,0071 m), 2 retentores de pneu (conjunto de tubos de aço de $\varnothing=5,08$ cm unidos em forma de cruz ou estrela), cinta de agrupamento (largura= 0,14 m, espessura=0,013 m e força de ruptura= 77472 N (7900 kgf)) e rebites ($\varnothing=0,0126$ m).

Figura 19 - Planta do módulo PT-1



Fonte: HARMS, 1982

Figura 20 - Desenho esquemático do módulo PT



Fonte: adaptado de HARMS, 1982

Onde, na Figura 17 tem-se:

B: comprimento do quebra-mar,

D: diâmetro do pneu,

d: profundidade,

G: distância eixo a eixo dos tubos do módulo PT,

H: altura de onda incidente,

L: comprimento da onda,

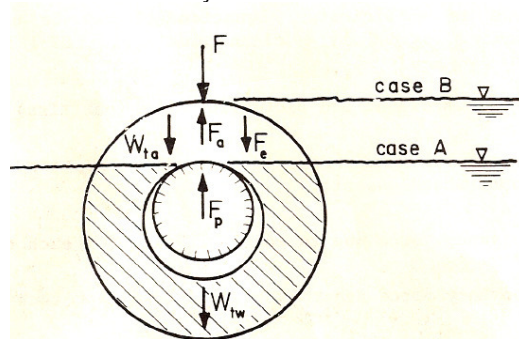
H_t : altura de onda transmitida,

λ : extensão do quebra-mar.

A montagem contou com 3 etapas principais, sendo estas o posicionamento dos pneus, o agrupamento destes com a cinta e fixação e por fim a inserção do tubo de aço.

A flutuabilidade do quebra-mar existe graças à presença de um volume de ar confinado na cavidade superior dos pneus que foi calculado em $0,034 \text{ m}^3$ (34 litros) por pneu. A Figura 21 apresentam a somatória de forças utilizada por HARMS (1982).

Figura 21 - Somatória de forças nos elementos flutuante do módulo PT



Onde, na Figura 18 tem-se:

F : peso adicional

F_e : força exercida pelos cabos de ancoragem

F_a : empuxo devido ao ar trapeado

F_p : empuxo devido ao tubo

W_{tw} : peso da parcela do pneu submerso em água

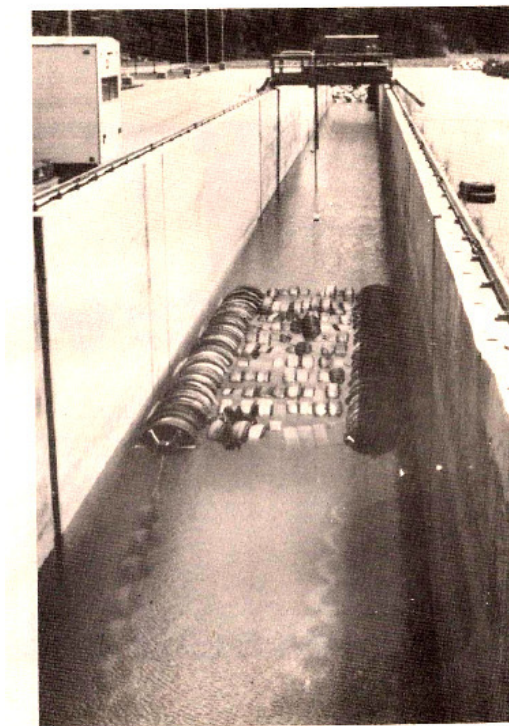
W_{ta} : peso da parcela do pneu emerso (em ar)

Fonte: HARMS, 1982

A estabilidade da estrutura depende do eventual depósito de sedimentos suspensos e cracas na região inferior do pneu que aumentaria o peso da estrutura. Uma alternativa para essa interferência é a utilização de poliuretano expansivo, preenchendo a cavidade superior dos pneus. Foi constatado que a utilização da espuma nos pneus aumenta a capacidade de carga do módulo em aproximadamente 5300 kg.

Os testes foram realizados no canal de ondas no U.S. Army Coastal Engineering Research Center (CERC) que possui 194 m de comprimento, 4,6 m de largura e 6,1 m de profundidade. A Figura 22 representa o canal e o modelo. Esse tanque foi operado nas profundidades de 2 m e 4,7 m para esse ensaio e produziu ondas de períodos de 2,6 a 8,1 s e altura de 0,15 m a 1,78 m. A Figura 23 mostra o momento do quebra-mar sendo ensaiado no canal. Uma vez montado o ensaio as instalações eram calibradas diariamente para realização das 290 rodadas com o PT-1.

Figura 22 - Módulo PT ancorado no canal do CERC



Fonte: HARMS, 1982

Figura 23 - Módulo PT sendo ensaiado no canal do CERC



Fonte: HARMS, 1982

A partir dos resultados, obtidos do PT-1, levaram a gráficos que relacionaram a taxa de redução, $C_t = H_t/H$ e o comprimento relativo da onda λ/L pra várias alturas de onda. Os dados mostraram que quanto maior λ/L , maior é o valor de C_t , o que significa que quanto maior o comprimento de onda, menor é a redução de altura de onda.

Quando comparados os resultados em diferentes profundidades observa-se que o quebra-mar é muito mais eficiente em profundidades menores. Os resultados sugerem que a extrapolação desses gráficos não deve ser feita para valores muito maiores do comprimento do quebra-mar (L), testado.

No que diz respeito à força de ancoragem, os resultados mostraram que com o aumento da altura da onda, a força aumenta exponencialmente, e ainda é maior em profundidades menores.

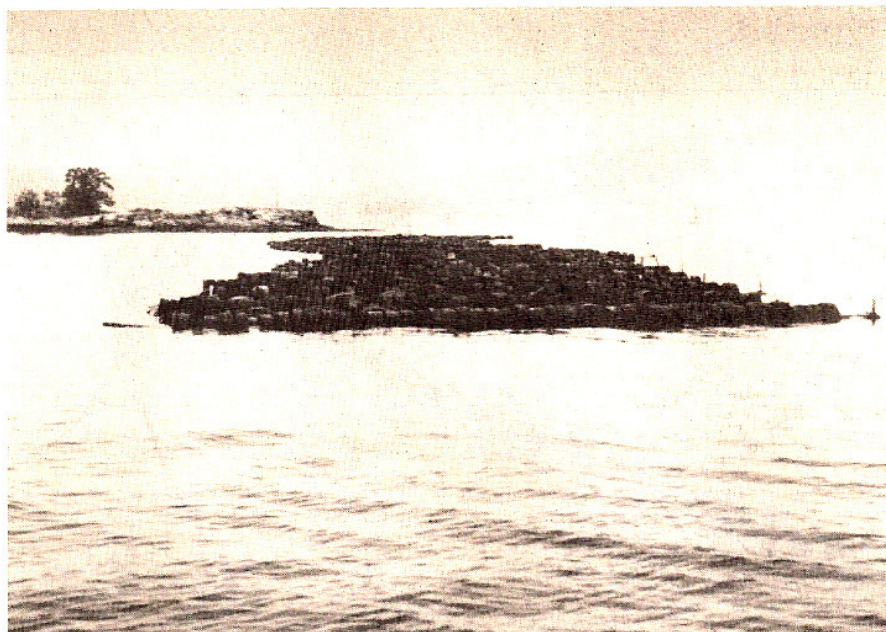
Surgiu a restrição para o módulo PT-2 de estar limitado à altura de onda incidente de 0,9 m. O desempenho do quebra-mar melhora com a diminuição do comprimento de onda e da profundidade. A barreira protege bem da onda incidente de comprimento menor que o comprimento do quebra-mar ($\lambda < L$). O módulo PT-1 se demonstrou mais eficiente que o PT-2, mas esse ensaio se aplica somente para quebra-mares de extensão entre 9 e 15 m. Foi construído um quebra-mar dessa concepção em escala real conforme a Figura 24 e Figura 25.

Figura 24 - Imagem do quebra-mar tipo PT instalado em Mamaroneck, NY, EUA



Fonte: HARMS, 1982

Figura 25 - Imagem do quebra-mar tipo PT instalado em Mamaroneck, NY, EUA



Fonte: HARMS, 1982

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem física consiste na experimentação de objetos em escala reduzida, inseridos em um sistema que reproduz as condições naturais. Para o sucesso da modelagem física é fundamental que três aspectos sejam contemplados: a semelhança geométrica, semelhança cinemática e semelhança dinâmica entre o modelo e o protótipo.

O modelo físico reduzido deve ser pequeno o suficiente para caber no espaço disponível e ser geometricamente semelhante ao protótipo, ou seja, as dimensões lineares do modelo são relacionadas às dimensões lineares do protótipo por um fator de escala constante (FOX, 2004), garantindo a semelhança geométrica do modelo.

O segundo requisito da modelagem física é a semelhança cinemática, ou seja, as velocidades medidas em pontos correspondentes do modelo e do protótipo devem diferir apenas por um fator de escala constante. Ressalta-se que para obter a semelhança cinemática é necessário satisfazer a condição de semelhança geométrica.

Por fim, é necessário correlacionar todas as forças atuantes entre o modelo e o protótipo, sendo essa relação chamada de semelhança dinâmica. Assim todas as forças envolvidas devem ser diretamente proporcionais, diferindo apenas por um fator de escala constante em todos os pontos homólogos. Segundo FOX (2004) a semelhança cinemática é necessária para a semelhança dinâmica, mas não suficiente.

A semelhança dinâmica completa é alcançada quando todos os grupos adimensionais independentes que descrevem o fenômeno hidráulico modelado têm o mesmo valor no modelo e no protótipo.

Os adimensionais mais importantes na hidráulica são o número de Froude, que relaciona a força de inércia e a força gravitacional, e o número de Reynolds, que relaciona as forças inerciais e viscosas. As Equações (2) e (3) representam os adimensionais de Froude e Reynolds, respectivamente.

$$F = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (3)$$

Onde

V: velocidade do escoamento,

d: diâmetro hidráulico,

v: viscosidade cinemática.

O adimensional que descreve o escoamento a superfície livre é o número de Froude (PIMENTA, 1981), pois relaciona a força gravitacional, que é a principal força restauradora em tais escoamentos. No campo da engenharia costeira trabalha-se com semelhança incompleta, onde apenas alguns adimensionais têm valores correspondentes. A semelhança de Froude, onde apenas a relação de Froude é respeitada, é satisfatória para escoamentos a superfície livre. Isso ocorre, porque a semelhança de Reynolds só seria alcançada com um valor de viscosidade cinemática diferente daquela que caracteriza a água. Segundo FOX (2004) trabalhar com semelhança incompleta nestes casos traz resultados satisfatórios.

A semelhança de Froude gera as escalas em função da escala geométrica (e) apresentadas na Tabela 4:

Tabela 4 - Escala gerada pela semelhança de Froude

Grandeza	Escala
Tempos	$e^{1/2}$
Aceleração	1
Esforços	e^3
Pressões	e
Vazões	$e^{5/2}$
Potencias	$e^{7/2}$

Fonte: adaptado de PIMENTA, 1981

O modelo físico reduzido de quebra-mar utilizando garrafa PET foi construído a partir de 1260 garrafas e uma gaiola de aço. As dimensões do modelo são 0,24 m de altura por 0,90 m de largura e 4,5 m de comprimento. O comprimento do canal é a dimensão longitudinal à onda e a largura a dimensão transversal à onda. O quebra-mar projetado é modular e, portanto as larguras dos módulos somam a extensão total do quebra-mar na direção transversal à frente de ondas.

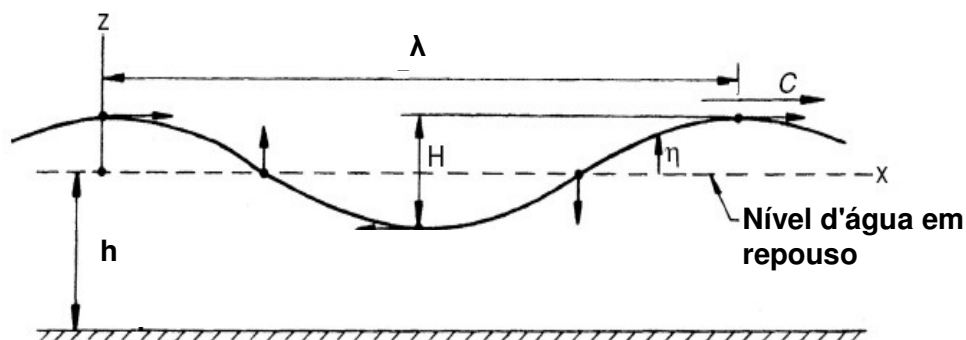
Primeiramente as garrafas PET de 0,0005 m³ (500 ml) foram condicionadas, que se fez selando a rosca com fita vedarósca para impedir que o ar trapeado na garrafa escape quando está estiver submersa. Fita multiuso foi usada para agrupar as garrafas em blocos que posteriormente foram unitizados com aço de construção e arame formando o modelo.

Os 8 cabos plásticos de ancoragem , fabricado de PET reciclado, foram fixados com grampos à armadura.

4.1 A TEORIA LINEAR DE ONDAS

A descrição física da onda é análoga uma onda mecânica e seus parâmetros geométricos são definidos considerando uma onda estática, conforme a Figura 26.

Figura 26 - Definições da onda estaticamente



Fonte: adaptado de SORENSEN ,2006

A teoria linear de ondas de Airy descrita nas Equações (4), (5), (6) e (7) representa as ondas matematicamente da forma mais simples em relação às demais teorias. Essa teoria se aplica para ondas de amplitude pequena em relação ao comprimento de onda ($H/\lambda \ll 1$). (USACE, 1984)

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (4)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kh \quad (7)$$

onde:

η : elevação da superfície livre;

k : número de onda;

ω : frequência angular da onda;

λ : comprimento da onda;

T : período da onda;

H : altura da onda;

h : profundidade da água;

g : aceleração da gravidade.

Simplificações clássicas devido ao comportamento assintótico nos limites estão representadas nas Equação (8) e Equação (9), para águas rasas e águas profundas, respectivamente.

$$\text{Águas rasas:} \quad \tanh(kh) \approx kh \Rightarrow \lambda = T\sqrt{gh} \quad (8)$$

$$\text{Águas profundas:} \quad \tanh(kh) \approx 1 \Rightarrow \lambda_0 = \frac{gT}{\omega} \approx 1,56T^2 \quad (9)$$

A teoria linear da onda permite a expressão da energia da onda de forma simples de difundida na engenharia costeira (SILVA, 2003). A energia em um volume de água de largura unitária, de comprimento λ e altura H é igual a soma da energia potencial (E_p), energia da partícula quando está acima no nível d'água de repouso, e cinética (E_k), energia da partícula em movimento. Na teoria de Airy quando as ondas se propagam na mesma direção E_k e E_p são iguais e resultam na expressão da densidade de energia (\bar{E}) conforme a equação (10). (USACE, 1984)

$$E = E_p + E_k = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \lambda}{16} + \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \lambda}{16} = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \lambda}{8} = \bar{E} \lambda \quad (10)$$

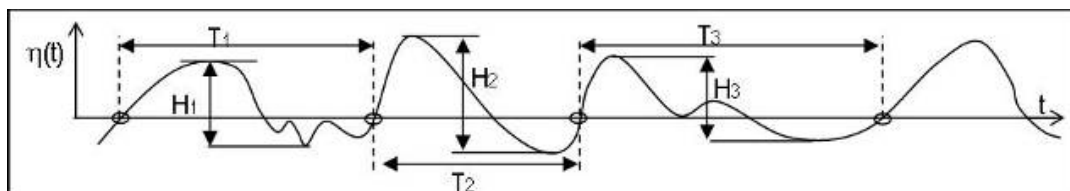
Apesar do uso do tratamento energético da onda ser difundido na engenharia costeira, as observações e discussões neste trabalho são feitas em torno da altura de onda.

4.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

O tratamento determinístico de ondas naturais, ondas irregulares, randômicas ou aleatórias, não se corresponde à realidade devido à sua característica não linear. Segundo SILVA (2003) devido às diferentes origens, direções, amplitudes, frequências e fases das ondas, o tratamento estatístico representa bem o fenômeno.

Optando pela abordagem estatística, a Figura 27 apresenta o método do cruzamento do zero ascendente, ou seja, o início de uma onda se dá no ponto em que a onda cruza o eixo do nível médio no sentido ascendente. A diferença lida entre o máximo e o mínimo entre dois pontos de zero ascendente é a altura. Já o período se lê computando a diferença entre dois pontos de zero ascendente no eixo do tempo.

Figura 27 - Representação do método de zero ascendente



Fonte: GIRELI, 2009

A partir das alturas e períodos encontrados no gráfico de um grupo de ondas calcula-se a distribuição das alturas com as alturas definidas conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Quadro de distribuição de alturas de onda

H_z	altura média das ondas
H_s	média das alturas das 1/3 maiores ondas
H_{10}	média das alturas as 10% maiores ondas
H_i	média das alturas as i% maiores ondas
T_z	período médio das ondas
T_p	período correspondente ao pico de energia do espectro

Fonte: GIRELI, 2009

4.3 O CANAL DE ONDAS

O canal de ondas do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - LHEPUSP é prismático e tem de 50 m de comprimento, 1,42 m de altura e 1,00 m de largura, conforme Figura 28.

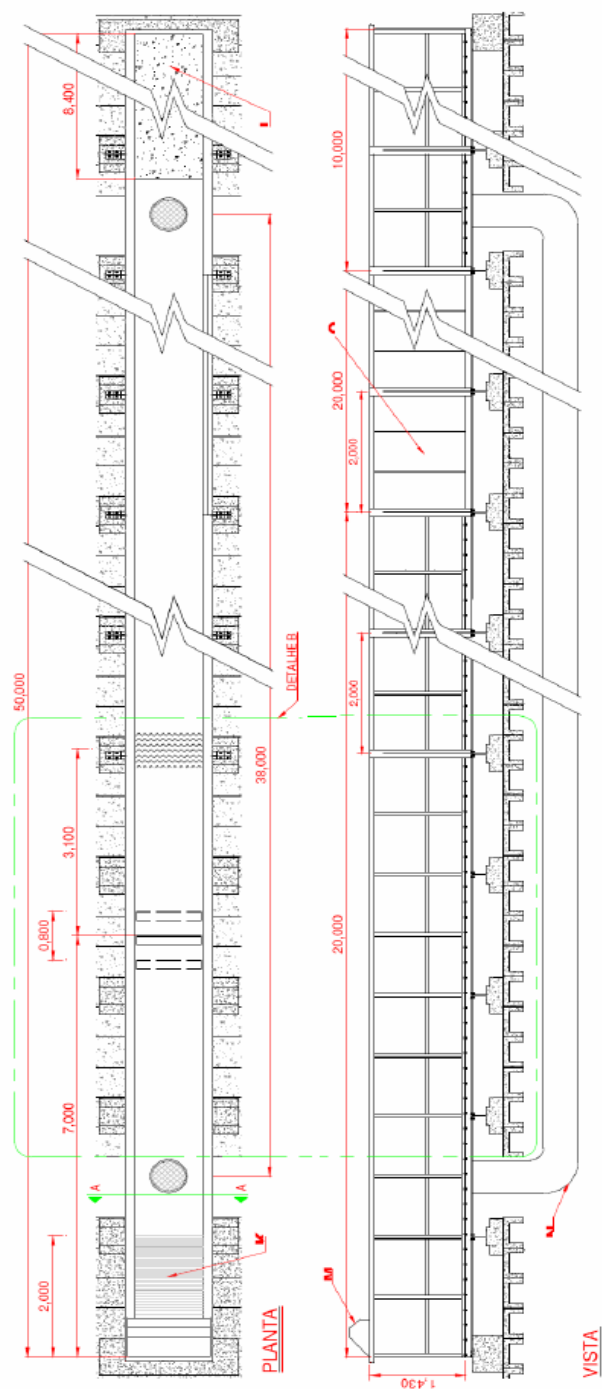
Figura 28 - O canal de ondas no LHEPUSP



Fonte: GIRELI, 2008

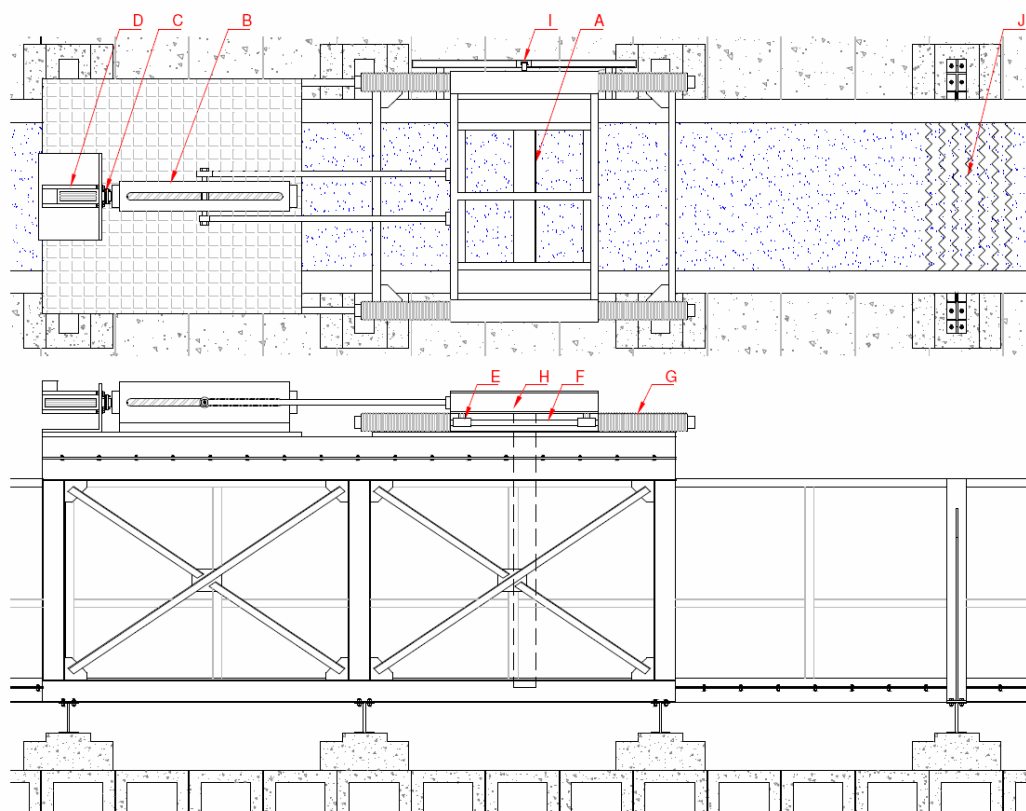
A estrutura metálica possui perfis metálicos a cada 2,00 m apoiados em calços de concreto (Vista da Figura 29). Na região central painéis de acrílico (item O da Figura 29) permitem a visualização subaquática em uma extensão de 20 m. Uma tubulação de PVC de 0,5 m de diâmetro (Corte A da Figura 30) permite o retorno da massa d'água de sotamar para barlamar em circuito fechado por baixo do canal (item N da Figura 29). A Figura 29 e a Figura 30 apresentam o desenho e os detalhes geométricos do canal de ondas.

Figura 29 - Projeto de construção do Canal de Ondas do FCTH



Fonte: GIRELI, 2008

Figura 30 - Detalhes construtivos do Canal de Ondas do FCTH



DETALHE: B

LEGENDA

A: PLACA DO GERADOR DE ONDAS;
 B: FUSO DE ESFERAS;
 C: JUNTA ELÁSTICA;
 D: SERVO MOTOR;
 E: ROLAMENTO LINEAR;
 F: EIXO GUIA;
 G: PROTEÇÃO SANFONADA
 H: CARRO GUIA DO GERADOR;
 I: SENSOR POTENCIOMÉTRICO;
 J: FILTROS DE TELA;
 K: ESTRUTURA ABSORVEDORA DE BARLAMAR;
 L: PRAIA ABSORVEDORA DE SOTAMAR;
 M: VIRADOR DE ONDAS;
 N: TUBULAÇÃO DE ALVIO;
 O: PAINÉIS DE VIDRO;

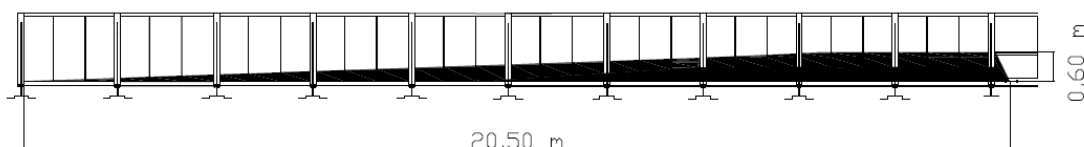
NOTA

MEDIDAS EM METROS

Fonte: GIRELI, 2008

O fundo do canal possui um lastro de argamassa, representado na Figura 31, que não pôde ser removido para esse ensaio. O lastro representa no canal o efeito de uma praia, pois a lâmina d'água diminui a sotamar. O lastro é localizado na região dos painéis acrílicos do canal, ou seja a 20,00 m do início do canal até 10,00 m do final, aproximadamente.

Figura 31 - Lastro de argamassa no canal de ondas

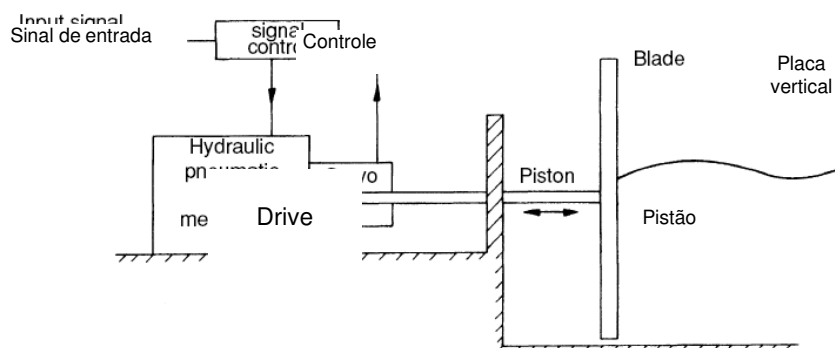


Fonte: GIRELI, 2008

Em sua experiência, GIRELI (2008) constatou que a faixa de atuação do batedor de maior eficiência é para ondas com frequências de 0,5 a 1,2 Hz gerando alturas de 0,1 a 0,5 m (100 a 500 mm).

O gerador de ondas do LHEPUSP é do tipo pistão e consiste de uma placa vertical movimentada por um carrinho que desliza em duas guias laterais, uma em cada borda do canal. O carrinho possui duas hastes ligadas a um bloco que percorre uma rosca sem fim (fuso). Um servo motor elétrico, responsável por traduzir o sinal do programa de controle de geração, imprime a força no bloco que percorre o fuso com as hastes do carrinho da placa. Assim a placa se movimenta conforme o sinal dado pelo sistema de controle de geração, conforme ilustra a Figura 32.

Figura 32 - Esquema do controle do batedor de onda do LHEPUSP



Fonte: adaptado de SORENSEN, 1993

As Figura 33, Figura 34 e Figura 35 mostram o canal do LHEPUSP.

Figura 33 - Vista superior do batedor de placa vertical



Figura 34 - Fuso do batedor de ondas



Figura 35 - Placa vertical



O servo motor instalado é de corrente alternada, sem escovas, 23 Nm e 3000 rpm; um servo conversor digital AC/DC, corrente nominal de 30 A (pico 90 A), entrada e saída analógica e digital; um servo amplificador PID; uma fonte de alimentação regulada; um painel de controle de sinais; além de um sensor potenciométrico para 100 cm, com precisão 1%, resolução infinita que é responsável pela realimentação do sistema a respeito da posição da placa do gerador de ondas.

Para minoração dos efeitos de harmônicos parasitas oriundos do processo de geração de ondas foram confeccionados, no próprio LHEPUSP, filtros metálicos em forma de colméia, fabricados a partir de telas de aço inox e instalados à frente do gerador de ondas, Figura 36.

Figura 36 - Filtro metálico



Fonte: Gireli, 2008

Para dissipar a energia das ondas, existem nas duas extremidades do canal de ondas, estruturas absorvedoras de energia de onda. A barlar está instalada uma estrutura vazada de madeira em forma parabólica. Já a estrutura de sotamar se traduz em uma praia absorvedora construída com núcleo de brita (Figura 37).

Figura 37 - Absorvedores de energia a barlar e sotamar, respectivamente



Fonte: Gireli, 2008

Para evitar que o movimento de pistonoamento de água gere uma declividade indesejada na linha d'água, ou seja, que o nível d'água fique mais elevado na extremidade contrária ao batedor, existe uma tubulação de 500 mm de diâmetro interligando inferiormente as extremidades do canal de ondas, regularizando o nível d'água. Para a medição das variações de nível d'água no interior do canal são empregadas pontas capacitivas acopladas à pontas limnimétricas presas à carrinhos que podem correr por toda a extensão do canal.

Segundo BIÉSEL e SUQUET (1951), batedores tipo pistão são indicados para ondas de grandes comprimentos de onda em relação à profundidade visto que, nestes casos, mesmo partículas muito próximas ao fundo tem amplitude de movimentação considerável quando da passagem da onda. Portanto, recomenda-se este tipo de batedor para estudos de obras costeiras, onde a relação comprimento de onda pela profundidade é grande.

4.4 DIMENSIONAMENTO DO MODELO

4.4.1 Comprimento

O ponto de partida para o dimensionamento deste modelo reduzido foi baseado em conclusões dos autores consultados, principalmente HARMS (1982). A relação λ/L é determinante para desempenho do quebra-mar, portanto o comprimento de onda é o dado inicial para as dimensões do quebra-mar.

A onda de projeto considerada em águas profundas apresenta o comprimento de onda (λ) conforme a Equação (9).

Calcula-se o comprimento de onda λ e consequentemente encontra-se o comprimento do quebra-mar (L) a partir da relação λ/L previamente definida. O comprimento do modelo (L') é obtido aplicando a relação de escala diretamente.

4.4.2 Largura

A largura do modelo não pode ultrapassar a largura do canal de ondas subtraída uma folga nas laterais e além desse fator limitador a largura deve necessariamente ser múltiplo do diâmetro das garrafas utilizadas para a modelagem. A largura da armadura é desprezível para o dimensionamento da largura do modelo.

4.4.3 Altura

A altura foi encontrada sendo necessariamente múltiplo do diâmetro das garrafas utilizadas além de ser importante ter várias camadas de garrafas para gerar os vazios por onde a água percola. Essa dimensão foi definida buscando uma boa relação entre altura e largura, entre a altura e a profundidade da água no canal e também a abrangência da altura em relação à altura de onda incidente.

4.5 DESENVOLVIMENTO DO QUEBRA-MAR EM MODELO REDUZIDO

Os principais materiais utilizados para a construção do modelo foram garrafas PET de 500 ml e aço de construção.

Na Tabela 6 encontram-se listados todos os materiais utilizados para a construção do modelo reduzido.

Tabela 6 - Materiais utilizados

Materiais Utilizados
1260 garrafas PET de 500ml
1260 tampas de garrafa
vedarosca
fita adesiva multiuso (tipo silvertape)
aço de construção
grampo de cabo de aço
corda

Inicialmente foram vedadas as garrafas com vedarosca para evitar entrada de água ou escape de ar quando comprimida conforme representado na Figura 38.

Figura 38 - Garrafas sendo vedadas com vedarosca



Em seguida conforme mostra a Figura 39 e a Figura 40 foram agrupadas em duplas e trios, para formar finalmente 21 blocos de 60 garrafas, ou seja, 4 fileiras de 15 garrafas.

Figura 39 - Montagem dos blocos



Figura 40 - Blocos enfileirados



Os blocos foram reforçados com um estribo de aço de construção de bitola 4,2 mm (Figura 41) e a união dos blocos foi feita com vergalhões e barras dobradas em forma de "U" de bitola 12,5 mm. Os vergalhões passam longitudinalmente pelo quebra-mar e são posicionados nos cantos e dois na face superior, conforme mostra a Figura 42, a Figura 43 e a Figura 44. As barras dobradas em forma de "U" abraçam as extremidades e são presas aos vergalhões superiores para fechar a gaiola e manter a união dos blocos longitudinalmente. Por razões construtivas e de transporte, as barras de aço tiveram de ser cortadas em barras menores, de 1,5 m, para viabilizar o transporte. A amarração tanto dos estribos quanto das longarinas foi feita com arame.

A disposição tampa com tampa e fundo com fundo foi escolhida desta forma para aumentar os vazios e possibilitar a perda de energia na turbulência causada por esses alargamentos e estrangulamentos do fluxo.

Figura 41 - Bloco envolto por estribo



Figura 42 - Croqui da estrutura de aço

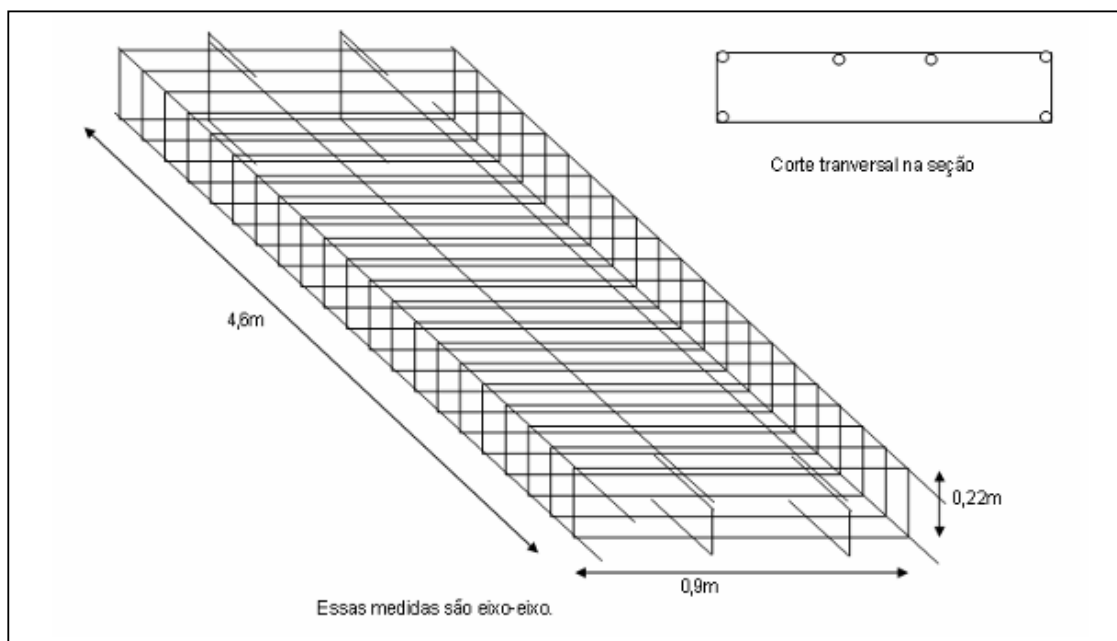


Figura 43 - Montagem da armadura



Figura 44 - Modelo com gaiola montada



Os 8 cabos de ancoragem foram fixados nas extremidades do modelo e 2 em cada lado da região central do quebra-mar. A ancoragem no fundo metálico do canal foi feita através de olhais soldados pelos quais os cabos passam e são fixadas a 8 catracas na borda do canal. A Figura 45 e a Figura 46 mostra os cabos de ancoragem.

Figura 45 - 4 cabos de ancoragem de barlamar passando pelos olhais e fixos a 4 catracas na borda no canal



Figura 46 - Cabo de ancoragem preso à gaiola



4.6 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

4.6.1 Ensaio Estático

O ensaio estático é a validação do modelo para utilização na simulação com ondas. O modelo, após construído, foi posicionado no canal com água e fixado neste através dos cabos de ancoragem. Avaliou-se o comportamento do modelo quando submerso.

Para submergir o modelo foram usados 8 guinchos manuais fixados à borda do canal, um por cabo de ancoragem.

Durante a montagem do quebra-mar demonstrou-se que o ângulo grande do cabo devido ao local de ancoragem no canal dificultou a submersão do modelo. O canal de ondas da FCTH é provido de um lastro de argamassa na forma de rampa que ocupa cerca de 20m ao longo do fundo com finalidade de simular batimetria para outras pesquisas, e, portanto, não pode ser removida. Devido à essa dificuldade foi desenvolvido um cavalete metálico que diminuísse o ângulo dos cabos de ancoragem, conforme apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Cavalete metálico



O cavalete da Figura 47 foi posicionado invertido no canal de forma que as sapatas se apoiassem na borda no canal e os pinos guiassem os cabos, conforme a Figura 48.

Figura 48 - Cavalete invertido e instalado

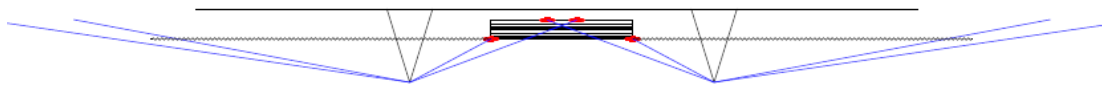


A Figura 49 e a Figura 50 contêm o desenho esquemático, fora de escala, do sistema de ancoragem desenvolvido para o modelo e os ensaios.

Figura 49 - Desenho esquemático em planta do sistema de ancoragem do modelo

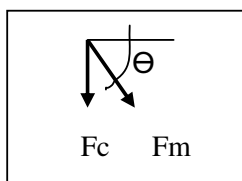


Figura 50 - Vista esquemática do sistema de ancoragem



A partir da medição dos ângulos e dos cálculos de empuxo, calcula-se a tensão máxima nos cabos de ancoragem quando em estado estático. A Figura 51 e a Equação (11) representam o cálculo da força.

Figura 51 - Direção das tensões devido ao empuxo



$$\text{Desse modo, } F_m = \frac{F_c}{\sin\theta} \quad (11)$$

O cabo de ancoragem feito de PET reciclado tem resistência à ruptura a 700 kgf conforme teste de carga fornecido pelo fabricante. O modelo é submerso conforme os cabos de ancoragem são tensionados com o auxílio de catracas presas às bordas do canal (Figura 52). No total foram utilizadas 8 catracas, uma para cada cabo de ancoragem.

Figura 52 - Catraca presa à borda do canal que recebe cabo de ancoragem



4.6.2 Ensaio Dinâmico

O ensaio dinâmico projetado consistiu em programa de 30 simulações com ondas diferentes, que necessitam ser calibradas individualmente antes do ensaio. A instrumentação e os equipamentos necessários para o ensaio dinâmico, além do modelo ancorado conforme o ensaio estático, estão listados na Tabela 7 .

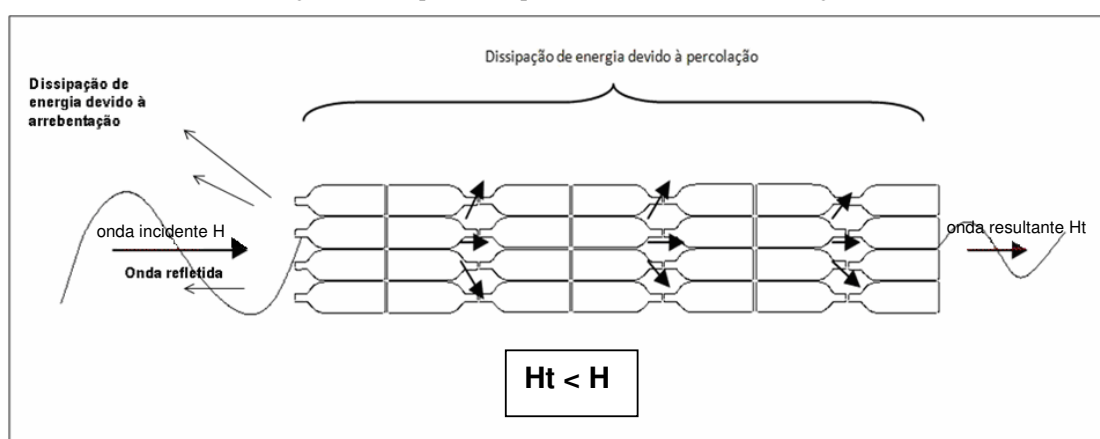
Tabela 7 - Relação de Instrumentação e equipamentos para ensaio dinâmico

Equipamentos e Instrumentação
Carrinho sobre o canal
Ponta limnimétrica
Ponta capacitiva
Computador e placa de aquisição de dados
Programa de controle e geração e software compatível

A Figura 53 representa a dissipação de energia que se busca atingir. A onda incidente encontra a estrutura, uma parcela da energia é refletida e, parte daquela que é sujeita à passagem pelo quebra-mar, é dissipada, devido à percolação pelos vazios das garrafas. O restante é transferido, permitindo que a onda siga seu percurso, porém com uma altura menor. A dissipação por percolação acontece devido às perdas de energia por atrito com as garrafas e na turbulência causada pelos aumentos e reduções bruscas na área transversal, atravessadas pelo fluxo de água.

O movimento orbital das partículas permite que uma parte da energia passe pela massa líquida que se desloca sob o quebra-mar. Essa quantidade de energia que passa varia conforme a lâmina d'água e se expressa em altura de onda sendo parcela da altura de onda resultante.

Figura 53 - Esquema em planta da transferência de energia



Os ensaios práticos com onda demandaram o uso do gerador de ondas do FCTH, software e programa de geração específico para esse canal e software, representados na Figura 54 e Figura 55 respectivamente.

Figura 54 - Placa batedora do gerador de ondas



Figura 55 - Estação de controle do gerador de ondas



O software utiliza linguagem LabVIEW e controla o batedor através do programa de Controle de Geração de Ondas desenvolvido por GIRELI (2008) na Escola Politécnica da USP.

Antes de realizar a simulação as ondas, elas são calibradas conforme altura d'água do canal durante o ensaio.

O programa, que recebe os dados de entrada, altura de onda e frequência, gera uma imagem (Figura 56) em tempo real para visualização do movimento da placa batidora. O mesmo ainda recebe entrada de dados de sensores para leitura da onda real. Os sensores utilizados são pontas capacitivas presas a pontas limnimétricas que permitem o posicionamento ideal da faixa de leitura (Figura 57). As pontas capacitivas, cujo erro é da ordem de 0,5%, medem a altura da onda em uma faixa de -5 a 5 V em de 25 cm e a transmite em tensão conforme o nível de submersão. O sistema de controle de geração recebe a informação de tensão da ponta capacitiva e a processa dando como saída a altura da onda em milímetros e a plota em um gráfico.

Figura 56 - Gráfico instantâneo gerado pelo programa Controle de Geração de Ondas



Figura 57 - Ponta limnimétrica instalada suportando a ponta capacitiva conectada



Nesse ensaio foram usadas duas pontas capacitivas: uma a barlamar e a outra a sotamar do modelo, capturando a altura da onda incidente e transmitida, respectivamente.

Antes de efetuar os ensaios com onda, as mesmas devem ser calibradas gerando coeficientes para calibração da altura de onda gerada, conforme dado de entrada. Determinou-se que a altura do nível d'água para os ensaios seria fixada em 1,0m; assim a onda gerada não transbordaria o canal.

Os dados de saída do programa, ou seja, os dados que geram o gráfico são salvos em arquivo com formato “txt” e os arquivos gerados permitem importação para o MS Excel, ferramenta usada para o tratamento dos dados.

Essa sequência de ensaios responderá perguntas a respeito da eficiência do modelo conforme variação de altura de onda e período. A princípio a estrutura é submersa até o nível d'água atingir o eixo do modelo referindo-se à altura do quebra-mar.

A Figura 58 mostra o cenário montado para o ensaio dinâmico.

Figura 58 - Equipamentos montados para ensaio dinâmico



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIO ESTÁTICO

A escala do modelo físico reduzido foi definida em um processo iterativo de cálculo teórico para acomodar diversas condições limitantes desse ensaio. Foram levados em consideração 3 aspectos, as dimensões do canal de ondas, faixa de atuação do batedor, a manuseabilidade do modelo e a quantidade de garrafas e por fim e a indicação de VELDEE (1983), que sugere que a escala para modelos reduzidos de quebra-mares seja no máximo 1:27.

A medida determinante para o dimensionamento do quebra-mar é o comprimento da onda da onda de projeto. A onda de projeto adotada é uma onda encontrada ao largo do litoral paulista, cuja altura significativa é 5 m com 8,5 s de período (GIRELI, 2009).

Aplicando a teoria linear de onda para o período de onda de projeto obtém-se o comprimento da onda em águas profundas $\lambda_0 = 112,8$ m.

Além da onda de projeto para a determinação das dimensões do modelo a faixa de alturas e períodos de ondas também foi definida a partir de ondas existentes no litoral paulista e assim tomou-se as ondas de 0,5 a 3,0 m com períodos de 4,5 a 8,5 s. A escala do modelo adotada foi 1:25 ($\epsilon = 25$), pois resulta em um modelo de proporções semelhantes ao modelo de HARMS (1982), as frequências de onda foram possíveis de serem geradas no canal e o número de garrafas estava disponível. Assim, para a escala 1:25 do modelo, o comprimento da onda gerada (λ') é:

$$\lambda' = \frac{112,8}{25} = 4,512 \cong 4,5 \text{ m}$$

Conforme descrito o comprimento da obra (L) e o comprimento da onda (λ) tem importante relação e para esses ensaios busca-se a razão 1:1.

$$L = \lambda \quad \therefore L' = 4,5 \text{ m}$$

Espera-se que dissipação de energia aconteça por percolação da água entre os elementos flutuantes. Para se aproximar ao máximo de uma simulação de situação real em relação ao material disponível e relação de volume para percolação, optou-se pela utilização de garrafas PET de 500 ml. A garrafa de 500 ml possui um diâmetro médio de 0,06 m, portanto a altura da obra tem de ser múltiplos de 0,06 m. Mais uma vez procurando alto índice de vazios na estrutura

e adequação à profundidade da água no canal o modelo foi construído com 4 fileiras de garrafas resultando em uma altura de 0,24 m.

A largura do modelo leva em consideração a largura do canal de ondas, uma vez que é importante o modelo poder se mover livremente no canal sem contato com as paredes. Mais uma vez múltiplos de 0,06m de largura do modelo é composta por 15 garrafas, ou seja, 0,9 m, permitindo 0,05 m de folga em cada lateral do canal.

A massa total do modelo pode ser estimada da seguinte maneira através da Equação (12):

- massa das garrafas

aproximadamente 0,05 kg (50 g) por garrafa segundo informação da

ABIPET

- massa do aço

52,5m de barras Φ 5,0 (0,130 kg/m)

36,0m de barras Φ 12,5 (1,000 kg/m)

$$M_m = n * M_g + (l_{4,2} * 0,130 + l_{12,5} * 1,000) \quad (12)$$

$$= 1260 * 0,050 + (52,5 * 0,130 + 36 * 1,000) = 105,825 \cong 110 \text{ kg}$$

O empuxo do modelo é calculado pela Equação (13):

$$E = n * V_g * \rho \quad (13)$$

$$= 1260 * 0,500 * 1 = 630 \text{ kgf} = 6178 \text{ N}$$

Portanto o valor resultante da força vertical, gerada na ancoragem e dirigida para cima é dada pela Equação (14):

$$F_{nv} = E - M_m \quad (14)$$

$$= 630 - 110 = 520 \text{ kgf} = 5100 \text{ N}$$

Conforme a Figura 51 e a Equação (15) a tensão máxima no cabo de ancoragem resulta em:

$$\text{Desse modo, } F_m = \frac{F_c}{\sin \theta}, \quad (15)$$

$$\text{com } \Theta = 10^\circ$$

Assim,

$$F_m = \frac{F_{tv}/8}{\sin 10} = \frac{(520/8)}{0,174} = 374 \text{ kgf} = 3668 \text{ N}$$

O modelo quando posicionado e submerso pela metade se mostrou rígido suficiente para ser submetido aos ensaios com onda, mostrando, entretanto, limitações em relação à submersão completa, pois a armadura é insuficiente para suportar a força de empuxo. O sistema de ancoragem foi aprovado para os ensaios previstos. O modelo fletiu em duas dimensões, comprimento e largura, conforme mostra a Figura 59.

Figura 59 - Flexão do modelo



Seguindo novamente o exemplo de HARMS (1982) foi decidido que pesos sobre o modelo auxiliariam no aumento do peso próprio, diminuindo o efeito do empuxo e diminuindo a tensão nos cabos de ancoragem. O ensaio dinâmico foi feito com sobrecarga de 120 kgf, conforme ilustra a Figura 60. Neste caso, a força total vertical (F_{tv}), durante o ensaio, pôde ser estimada pela Equação (16):

$$\begin{aligned} F_{tv} &= E - Mm - 120 \\ &= 630 - 110 - 120 \\ &= 400 \text{ kgf} = 3920 \text{ N} \end{aligned} \tag{16}$$

Figura 60 - Sobrecarga no modelo



O calculo do volume de ar do modelo se dá multiplicando-se o numero de garrafas pelo volume conforme a equação 17.

$$\begin{aligned} n * V_g &= \\ 1260 * 0,5 &= 630 \text{ l} = 0,63 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (17)$$

O volume de vazios, ou seja, o volume entre as garrafas do modelo é calculado através da subtração do volume de ar do volume total do prisma fictício feito das dimensões totais do modelo (Equação (18)).

$$\begin{aligned} 4,5 * 0,9 * 0,24 &= 0,972 \text{ m}^3 \\ 0,972 - 0,63 &= 0,342 \text{ m}^3 \\ 0,342 / 0,63 &= 0,54 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (18)$$

5.2 RESULTADOS DO ENSAIO DINÂMICO

5.2.1 Ondas Ensaaiadas

O ensaio dinâmico consistiu em 28 ensaios de ondas diferentes, cada um com duração de 600 s (10 min).

5.2.1.1 Altura

Para avaliação da eficiência da estrutura, bem como seus limites de atuação, foram definidas as seguintes alturas de onda em escala real (H) a serem ensaiadas: 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m, e 3,0 m. A conversão para a escala do modelo reduzido se dá linearmente, resultando, portanto em alturas H' igual a 0,02 m, 0,04 m, 0,06 m, 0,08 m, 0,10 m, e 0,12 m (20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm, e 120 mm), respectivamente.

5.2.1.2 Período

O período juntamente com a profundidade define o comprimento da onda λ e, portanto a relação λ/L . Para avaliar a eficácia da estrutura para diferentes relações λ/L foram definidos os seguintes períodos de ondas em escala real (T) a serem ensaiados: 4,5 s, 5,5 s, 6,5 s, 7,5 s e 8,5 s. A conversão para o período gerado no canal (T'), com base na semelhança de Froude resultou em períodos de 0,9 s, 1,1 s, 1,3 s, 1,5 s e 1,7 s.

5.2.1.3 Frequência

Como o sistema de geração de ondas do canal usa a frequência da onda ($f=1/T$), ao invés de seu período, as frequências em escala real (f) que resultam dos períodos adotados são: 0,222 Hz, 0,182 Hz, 0,154 Hz, 0,133 Hz, e 0,118 Hz.

As frequências geradas no canal de ondas (f') são: 1,111 Hz, 0,909 Hz, 0,769 Hz, 0,588 Hz e 0,667 Hz.

5.2.1.4 Limites do Canal

Durante a calibração das ondas verificou-se o limite do canal em relação à esbeltez de onda. O batedor de ondas não consegue gerar as ondas de 120 mm e 100 mm com o período de 0,9 s, portanto o ensaio foi feito com as 28 demais ondas conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Ondas ensaiadas

H (m)	T(s)	f (1/s)	H' (mm)	T' (s)	f' (1/s)
0,5	4,5	0,222	20	0,9	1,111
1,0			40		
1,5			60		
2,0			80		
0,5	5,5	0,182	20	1,1	0,909
1,0			40		
1,5			60		
2,0			80		
2,5			100		
3,0			120		
0,5	6,5	0,154	20	1,3	0,769
1,0			40		
1,5			60		
2,0			80		
2,5			100		
3,0			120		
0,5	7,5	0,133	20	1,5	0,667
1,0			40		
1,5			60		
2,0			80		
2,5			100		
3,0			120		
0,5	8,5	0,118	20	1,7	0,588
1,0			40		
1,5			60		
2,0			80		
2,5			100		
3,0			120		

As ondas que foram ensaiadas resultaram em comprimentos de onda λ' , relação comprimento de onda e comprimento do quebra-mar λ'/L' e esbeltez δ conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados teóricos do ensaio dinâmico

T'(s)	H'(m)	λ' (m)	λ'/L'	δ (H'/ λ')
0.9	0.02	1.26	0.28	0.016
	0.04			0.032
	0.06			0.048
	0.08			0.063
1.1	0.02	1.87	0.41	0.011
	0.04			0.021
	0.06			0.032
	0.08			0.043
	0.10			0.053
1.3	0.12	2.55	0.56	0.064
	0.02			0.008
	0.04			0.016
	0.06			0.024
	0.08			0.031
	0.10			0.039
1.5	0.12	3.23	0.71	0.047
	0.02			0.006
	0.04			0.012
	0.06			0.019
	0.08			0.025
	0.10			0.031
1.7	0.12	3.91	0.86	0.037
	0.02			0.005
	0.04			0.010
	0.06			0.015
	0.08			0.020
	0.10			0.026
	0.12			0.031

5.2.2 Redução de Ondas e Comportamento do Modelo

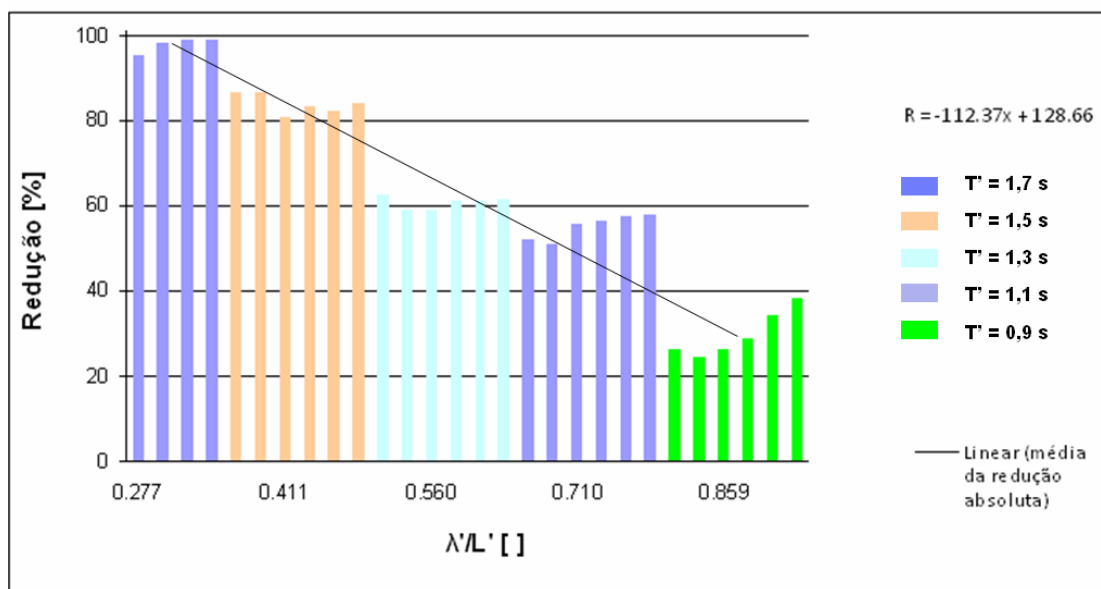
A redução de altura ($R = H/H_i'$) de ondas foi grande e pode ser observada a olho nu durante os ensaios. A interpretação dos dados lidos pelas pontas capacitivas está evidenciada no Anexo A, Anexo B e Anexo C que apresentam os resultados de cada simulação, sob forma de tabela de dados, a partir dos quais foram montadas a Tabela 10, a Figura 61 e a Figura 62.

Tabela 10 - Tabela de redução de altura de onda

T' (s)	H' (mm)	R (%)
0.9	20	95.2
	40	97.9
	60	98.5
	80	98.5
1.1	20	86.5
	40	86.4
	60	80.6
	80	82.9
	100	82.2
	120	83.8
1.3	20	62.4
	40	58.8
	60	59.1
	80	61.3
	100	61.0
	120	61.7
1.5	20	52.2
	40	51.1
	60	55.3
	80	56.2
	100	57.4
	120	58.0
1.7	20	26.2
	40	24.5
	60	26.4
	80	28.6
	100	33.9
	120	38.3

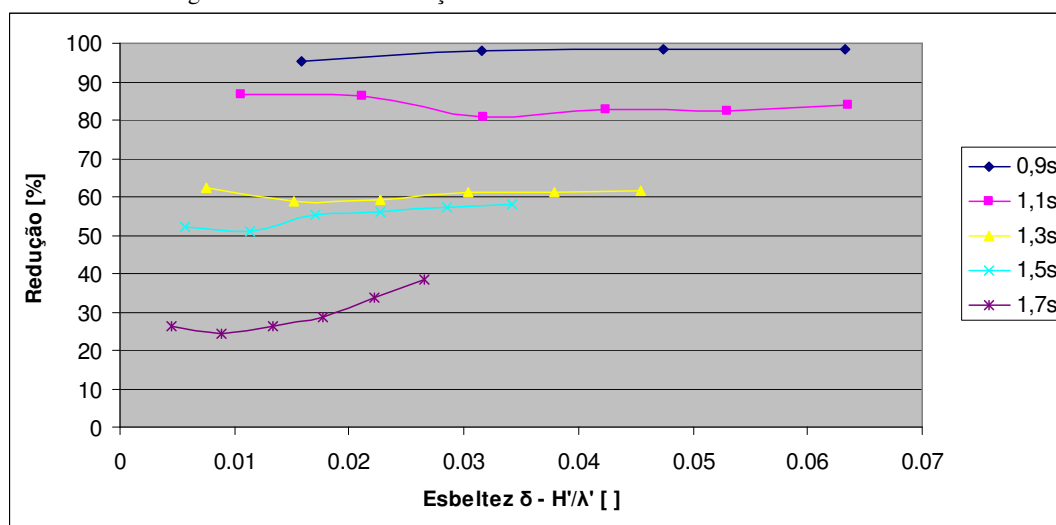
A tabela 10 mostra grandes reduções de altura de onda, sendo o valor máximo encontrado nesses ensaios 98% uma redução que representa praticamente o desaparecimento da onda.

Figura 61 - Gráfico de redução de altura relacionado com o comprimento de onda



A Figura 61 que relaciona a redução da altura com o comprimento de onda mostra forte dependência desse parâmetro na redução; o gráfico apresenta a redução por onda. Conforme o aumento do comprimento de onda (λ') verifica-se queda na redução de onda. A partir da indicação da Figura 61 foi traçado o gráfico da redução em relação à esbeltez que resultou na Figura 62. O gráfico mostra uma dependência da esbeltez δ até um valor de aproximadamente $\delta = 0,03$, pois as curvas tem uma tendência assintótica horizontal a partir desse valor. As ondas com $\delta > 0,03$ não demonstram relação desse parâmetro com a redução de altura de onda.

Figura 62 - Gráfico de redução de altura relacionado com a esbeltez da onda



A partir desse gráfico pode ser concluído que o desempenho desse modelo é maximizado quando atingido por uma onda esbelta ($\delta \geq 0,03$).

5.2.3 Efeito de Fundo na Redução de Altura

A onda sofre perda de energia devido ao atrito com o fundo e à presença da obra. O efeito de fundo na configuração do ensaio foi analisado calculando o fator de empolamento K_s conforme a equação (1). O ANEXO D mostra o processo de cálculo dessa análise, enquanto a Tabela 11 contém as profundidades dos pontos de interesse do ensaio e a Tabela 12 mostra a influência do fundo na redução de altura de onda.

Tabela 11 - Profundidades nos pontos de interesse do ensaio

Posição	h(m)
Ponta Capacitiva a barlar	0,83
Barlar do modelo	0,82
Sotamar do Modelo	0,68
Ponta Capacitiva a sotamar	0,67

Tabela 12 - Análise do Efeito de Fundo

T'(s)	H' (mm)	h/λ'	Tipo da água	Redução só devido ao QM (%)	Redução absoluta pela onda media (%)
0.9	20	0.65	Profunda	94.8	95.2
	40			97.8	97.9
	60			98.4	98.5
	80			98.4	98.5
1.1	20	0.43	Intermediária	85.6	86.5
	40			85.5	86.4
	60			79.3	80.6
	80			81.7	82.9
	100			80.9	82.2
	120			82.7	83.8
1.3	20	0.31	Intermediária	61.1	62.4
	40			57.4	58.8
	60			57.7	59.1
	80			60.0	61.3
	100			59.7	61.0
	120			60.4	61.7
1.5	20	0.23	Intermediária	51.9	52.2
	40			50.8	51.1
	60			55.1	55.3
	80			56.0	56.2
	100			57.2	57.4
	120			57.8	58.0
1.7	20	0.18	Intermediária	27.6	26.2
	40			26.0	24.5
	60			27.9	26.4
	80			30.0	28.6
	100			35.2	33.9
	120			39.5	38.3

O efeito de fundo nesse ensaio foi muito pequeno. Observa-se que a redução total considerando puramente a leitura da onda resultante é muito próxima da redução calculada descontando o efeito do fundo na redução. No sentido de crescimento do comprimento da onda observa-se um aumento na atuação da obra. Isso decorre diretamente da fase do empolamento na qual se encontra a onda. O ponto de medição da altura das ondas nesse ensaio é fixo e devido à variação do comprimento da onda ao longo dos ensaios, as ondas são medidas em diferentes fases

do empolamento. Quando medidas as ondas curtas estão sujeitas à fase inicial do empolamento, nesse ponto a dissipação de energia pelo atrito com o fundo para essa onda é preponderante e, portanto acontece a queda de altura nessa onda. À medida que o comprimento da onda ensaiada aumenta a onda passa a sofrer o aumento na altura de onda devido ao empolamento no ponto de medição, pois é sujeita à fase do fenômeno em que a o aumento da densidade da energia é preponderante. O efeito do empolamento para as ondas curtas contribui com a redução de altura e a obra reduz uma onda já levemente reduzida, enquanto para as ondas longas o quebra-mar é mais solicitado, pois a onda que é reduzida está um pouco mais alta.

5.2.4 Limite do Modelo

Durante os ensaios foi verificado que à medida que o comprimento de onda é aumentado o modelo se deforma mais durante a simulação. Comprimentos menores não exigem tanto da rigidez do modelo quanto as os períodos mais longos. O modelo teve de ser reforçado duas vezes durante o ensaio com onda de 3,0 m de altura e 8,5 s de período (escala real), enquanto que para onda de até 6,5 s de período (escala real), não foram detectados maiores problemas.

5.3 DISCUSSÃO GERAL

O ensaio dinâmico proporcionou observações conclusivas em relação à importância da relação λ/L , em concordância com a literatura. Comprovada a forte dependência, ainda não se sabe qual é a relação que otimiza o desempenho, mas o ensaio com ondas longas mostrou que o modelo se movimenta similarmente ao movimento da onda. Isso é indesejável, pois nesse caso o obstáculo está permitindo que a onda transfira sua energia e este acompanha seu movimento. A intenção é que ocorra dissipação de energia sob outras formas e não a transferência da mesma para o quebra-mar gerando deslocamento.

A dissipação de energia no quebra-mar tipo esteira é principalmente devido às perdas por atrito durante a passagem da onda, a percolação da massa d'água, pelo quebra-mar. O fenômeno da percolação é definido pelo dicionário *online* MICHAELIS de 2012 como a "passagem lenta de um líquido através de um meio filtrante", e neste caso o meio filtrante é a esteira de garrafas.

A massa de água atinge o a obra e infiltra, pois essa concepção de quebra-mar é permeável, permitindo que a massa de água movimentada pela onda se movimente em todas as direções nos espaços entre os elementos flutuantes. O encontro do fluido com as paredes das

garrafas durante a percolação gera turbulências onde energia é dissipada por atrito, calor e som.

Em termos de escala o tamanho das garrafas está distorcido, pois não se encontra garrafas PET na escala 1:25 no mercado; uma garrafa PET de 2 litros vendida comercialmente teria que ter diâmetro de 4 mm. A distorção foi validada uma vez que puderam ser usadas garrafas de 500 mililitros, uma escala de 1:4 em relação à garrafa mais comum, de 2 litros e por causa da hipótese feita assumindo-se que quanto menor o tamanho e maior o número de vazios, maior a dissipação de energia.

Neste modelo o volume dos vazios (espaços entre as garrafas) é metade do volume de ar trapeado, sendo a relação, portanto 1:2. Pretende-se em um próximo modelo ensaiar uma relação próxima de 1:1 para avaliar o comportamento. Espera-se que quanto menores os vazios, mais energia seja dissipada até um limite, quando os vazios forem poucos e pequenos demais e a dissipação de energia por reflexão passará ser mais significativa.

O direcionamento das garrafas com a extremidade de menor área a barlar é estratégico para que a reflexão seja pequena. O arranjo das garrafas foi feito para gerar vazios significativos, e amenizar a reflexão. Se tiver muita área de impacto a ancoragem tem de ser reforçada e o objetivo é desenvolver uma estrutura esbelta.

Foi verificado que a estrutura adotada para o modelo é apropriada apenas para a modelagem. A instalação para aplicação real deverá sofrer alterações na concepção da gaiola. As barras de aço utilizadas mostram sinais de corrosão após 6 meses de ensaios além de ser notável a falta de rigidez devido à configuração atual do uso de barras menores e estas serem amarradas simplesmente com arame. Existe a expectativa de se conseguir materiais mais apropriados para envolver os elementos flutuantes, por exemplo, telas de gabiões. A gaiola tem que atender a três funções: ser capaz de agrupar as garrafas e manter a forma prismática do quebra-mar, dar rigidez à estrutura e possibilitar a fixação dos cabos de ancoragem.

A ancoragem foi o ponto crítico para a montagem e validação do modelo estaticamente. O fato do canal não permitir a ancoragem com ângulo pequeno onde há um lastro de argamassa simulando a batimetria de uma rampa de linha de costa é crítico e este terá que ser removido para os próximos ensaios. A rampa não impossibilitou o ensaio, mas dificultou a colocação dos pontos de ancoragem na posição adequada, o que levou à redução do ângulo do cabo de ancoragem e a instalação dos cavaletes metálicos foi essencial no direcionamento dos esforços no cabo de ancoragem.

O sistema de ancoragem desenvolvido para o ensaio se mostrou suficiente, mas precisa ser revisto em se tratando de desenvolver um sistema aplicável por ocasião de instalação em campo. Não haverá necessidade do cavalete metálico e o sistema de ancoragem será dimensionado e definido no momento do projeto, antes da construção. Sugere-se o uso de material disponível na indústria naval como correntes, manilhas, poitas ou âncoras, pois a exposição ao ambiente salino e úmido gera deterioração e é recomendável que sejam utilizados materiais resistentes às intempéries para reduzir e facilitar a manutenção.

O que pôde ser medido no canal durante o ensaio da onda mais comprida, ou seja $T' = 1,7$ s, foi de $\lambda'/L' > 1$, diferente daquilo que o cálculo teórico pela teoria linear de ondas previa. Foi calculado que para a onda de $T' = 1,7$ s, $\lambda' = 3,91$ e $\lambda'/L' = 0,86$ mas foi observado $\lambda' = 4,7$ levando a $\lambda'/L' = 1,04$. Isso explica o comportamento menos resistente do modelo durante esse ensaio, mas ainda assim permitiu que se concluísse, pelo ensaio em modelo físico reduzido, que $\lambda/L \leq 1$ é de fato um limite recomendável para esse tipo de obra. Essa limitação pode ser comprovada fisicamente, pois ao longo dos testes foram necessárias duas paradas para reforço do modelo quando a maior onda era ensaiada. O teste com período de onda resultando em $\lambda/L = 0,28$ gerou resultados surpreendentes, pois nenhum autor relatou eficiência de redução de altura de onda da ordem de 98%, ou seja, o quebra-mar modelo praticamente eliminou a onda.

O resultado da redução de altura de onda para $\lambda/L < 1$ levou à idéia se fazer uso dessa concepção de quebra-mar para proteção de margens de reservatórios. As ondas que erodem o pé dos taludes são de período curto e alturas razoavelmente pequenas quando comparadas a ondas oceânicas. Por se tratar de períodos pequenos pode-se esperar que o quebra-mar assumiria dimensões reduzidas uma vez que o seu comprimento é dependente do comprimento de onda que por sua vez é função do período.

Uma vantagem dessa obra é não depender das características do solo, pois um solo mole ou com baixa capacidade de suporte, pode garantir boa tença portanto inviabilizar o quebra-mar enraizado, como o de talude, berma ou parede vertical. A única saída e não menos eficiente pode ser o quebra-mar flutuante.

Em relação às desvantagens pode-se listar principalmente a integridade estrutural de um quebra-mar flutuante de esteira, que tem limites menores que uma estrutura de massa inercial maior. Todavia, identificando os limites e obedecendo corretamente a faixa de atuação para qual

ele foi projetado, o quebra-mar de esteira exerce satisfatoriamente sua função de reduzir a onda incidente.

No caso de elementos flutuantes preenchidos com ar, existe a preocupação com a perfuração indesejada. Essa situação é contornável com um projeto, avaliação de risco e mitigação realizados com qualidade.

Esse tipo de estrutura exige manutenção mais frequente para garantir a integridade dos sistemas de união dos elementos flutuantes e da ancoragem, pois, se um dos dois falharam, seja os elementos flutuantes ou o quebra-mar como um todo, a obra se torna um problema ambiental.

5.4 ASSUNTOS A SEREM PESQUISADOS FUTURAMENTE

A continuação da pesquisa é essencial para a obtenção de volume de dados para cercar as incertezas desse conceito novo. A concepção geral foi ensaiada em modelo físico reduzido e se mostrou promissora. Assim, diversas frentes de pesquisa se abrem com o aparecimento do quebra-mar de garrafa PET. Tópicos como a influência do tamanho da garrafa, o material para envolver as garrafas, a ancoragem, a influência no transporte de sedimentos, o efeito da profundidade, altura do quebra-mar, a submergência e o impacto visual, serão pesquisados, dando sequência a esse projeto.

É interessante para o projeto conhecer o comportamento da concepção proposta com tamanho de garrafas maiores. O modelo ensaiado foi feito com garrafas de aproximadamente 0,5 l (500 ml) e gerou a perda por percolação conforme apresentado. A variação no tamanho da garrafa altera o volume entre as garrafas onde as turbulências e as perdas por percolação ocorrem, portanto é um aspecto interessante e importante a ser analisado. Está prevista a montagem de mais um modelo similar ao apresentado com garrafas PET de 2 litros para comparação da eficiência.

O modelo ensaiado foi montado com aço de construção nervurado e estribos. A configuração atual se mostrou suficiente para os testes iniciais em laboratório, mas insuficiente para reprodução em escala real. O material que envolve as garrafas deve satisfazer no mínimo a esses quatro quesitos: resistir aos esforços nos pontos de ancoragem, deve manter as garrafas unitizadas e consequentemente garantir a geometria do quebra-mar, deve promover a rigidez ao quebra-mar e resistir ao ambiente aquático (fluvial ou marinho). A corrosão foi observada em laboratório fazendo uso de água doce tratada, o que sugere que uma amostra em campo é um

indicador que resultaria em dados importantes para previsão da manutenção. Certamente será necessário o uso de aço, mas esse deve ser revestido por material protetor inerte à oxidação. As primeiras ideias sugerem o uso de gabião estruturado e revestido por PVC para agrupamento das garrafas e rigidez.

Desenvolver um sistema de ancoragem compatível com o modelo e as instalações físicas disponíveis foi a etapa mais difícil e demorada do ensaio estático. O canal de ondas do FTCH conta com um lastro de argamassa que impossibilitou a amarração dos cabos de ancoragem com ângulo pequeno. Foi necessário trabalhar com ângulos grandes que multiplicam os esforços e dificultam o afundamento da estrutura. A remoção desse lastro e uma rodada de ensaios variando a angulação e o posicionamento dos pontos de fixação tanto no modelo quanto no canal é imprescindível para otimizar a ancoragem e propor uma opção aplicável em campo. Espera-se que o material de ancoragem apropriado para esse tipo de obra seja correntes aprovadas para o uso naval. O elemento transmissor deve ser resistente à fadiga e eventual ressonância dos cabos causados pela solicitação ondulatória; ensaios específicos para avaliar o material são necessários. Além do elemento transmissor de esforços, cabo ou corrente, o elemento dissipador precisa ser estudado; ancora ou poita devem ser escolhidos conforme condições individuais de projeto.

Espera-se que a interferência de quebra-mares flutuantes no transporte de sedimentos de fundo seja pequena, uma vez que o quebra-mar ocupa apenas parte superior da coluna d'água. O transporte de sedimentos realizado pelas ondas que atingem a linha de costa certamente será alterado, pois na região abrigada pelo quebra-mar a energia da onda seguirá até a costa com menos energia e conseqüentemente com menos capacidade de transporte de sedimentos. É de se esperar que esses sedimentos se depositarão das imediações do quebra-mar, onde a onda perderá energia. Isso depende das características do sedimento, e das correntes locais e da distância da obra a costa, se o quebra-mar for posicionado perto da costa possivelmente se formará um tómbolo por conta da difração das ondas que contornam a obra, caso a distancia seja grande, provavelmente não haverá modificações perceptíveis na dinâmica sedimentar junto a linha de costa devido a manutenção da corrente longitudinal costeira.

A influencia da profundidade nesse tipo de quebra-mar ainda terá que ser estudada através de simulações em laboratório e ensaios em campo com estruturas em escala real. Os depósitos devido a difração e a reflexão da onda serão estudados, mas também variam conforme as

condições locais. Simulações em laboratório alterando a profundidade ainda não foram possíveis devido às instalações de físicas disponíveis.

Durante a etapa da modelagem física apresentada não foi possível estudar o posicionamento do quebra-mar em relação à sua submersão. Os ensaios realizados contaram com variação de altura de onda e período destas, porém o quebra-mar permaneceu 50% submerso quando o nível d'água parado. Com 0,24 m (24 cm) de altura o modelo reduzido criava um obstáculo maior que a altura de onda. Avaliou-se que em campo, em escala real, essa situação não existirá e, portanto é necessário estudar qual a altura mínima do quebra-mar em relação à altura da onda incidente. Submergir todo o quebra-mar pode ser uma solução, pois a massa de água que passará por cima da obra perderá energia arrebatando e ainda pode somar vantagem em relação à mitigação do impacto visual, mas o desempenho dessa situação ainda não foi avaliado.

Obras de abrigo são necessárias e o impacto visual de qualquer obra quebra-mar existe. Um espelho d'água que pertencia a paisagem natural sem nenhuma construção civil, ganha um elemento fruto da ação antrópica. O quebra-mar é uma obra acostável a sotamar e pode ser usado como píer de pesca ou recreação. Como qualquer obra emersa a plataforma superior pode ser trabalhada, decorada, iluminada ou mesmo vegetada. As mitigações desse impacto dependem dos esforços e da disponibilidade financeira dos interessados no projeto.

A concepção desse modelo explora a dissipação de energia por atrito devido à percolação entre os elementos flutuantes. Esse é o grande diferencial da obra, pois a maioria dos quebra-mares reduz a energia da onda principalmente por reflexão causando uma área de grande turbulência a barlar da obra e dificultando a fixação da obra, pois toda a energia que atinge a obra na face à barlar é absorvida, e transmitida ao fundo, ou refletida. Com o uso de elementos flutuantes agrupados a energia da onda não atinge o quebra-mar de uma só vez na face de impacto, pois massa d'água atravessa a obra perdendo energia ao longo do percurso.

6 CONCLUSÃO

O projeto, a construção, a validação do modelo e os ensaios dinâmicos do modelo físico reduzido do quebra-mar de garrafa PET relatados nesse trabalho mostrou que as concepções alternativas às convencionais tem grande potencial de sucesso. Materiais de construção economicamente mais atrativos, métodos ecologicamente mais favoráveis e redução quase total da altura de ondas são destaques desse tipo de obra.

Os ensaios mostraram que a redução de altura de onda aumenta em função da diminuição da relação λ/L e, portanto conhecendo seu comportamento, esse tipo de quebra-mar deve ser usado para ondas curtas, respeitando a relação $\lambda/L \leq 1$. Outros limites do quebra-mar não puderam ser estabelecidos devido à modelagem ter sido em modelo reduzido, em canal com profundidade restrita e também dependente da faixa de atuação do batedor de ondas.

Este trabalho traz os parâmetros para o pré-dimensionamento de quebra-mares deste tipo, com elementos flutuantes agrupados, e através dos dados obtidos e das análises feitas permite estimativas de eficiência em termos de redução de altura de onda.

O resultado positivo dessa modelagem garante interesse na continuidade da pesquisa devido às inúmeras vantagens desse conceito sobre os que estão atualmente em uso. Esse conceito de quebra-mar é inovador, pois reduz a energia da onda devido à percolação entre os elementos flutuantes. O uso dessa tecnologia a torna economicamente atrativa e enxuta em termos dos materiais de construção. A redução de quase toda altura de onda e o baixo custo dessa obra são fatos que tornam essa concepção de quebra-mar interessante para a engenharia costeira.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRY, G.B. **Tides and waves**. Encycloped.Mettropolitana, V, Art 525-528. London, 1845.

ALFREDINI,P.; ARASAKI,E. **Obras e Gestão de Portos e Costas**. 2ª ed. São Paulo, Brasil: Ed. Edgard Blücher, 2009.

ANGULO, R. **Notas de Aula**. Paraná, Brasil: Universidade Federal do Paraná, 2001.

Associação Brasileira da Indústria do PET - ABIPET, www.abipet.org.br, São Paulo, Brasil. (vários acessos)

BIÉSEL, F., SUQUET, F.**Les appareils générateurs de houle en laboratoire**. La Houille Blanche, Grenoble: 1951.

BRADLEY, J.M. **Floating Breakwaters Predicting their Performance**. Canadá: University of Newfoundland,1998.

BRUUN, P. Port Engineering, **Harbor Planning, Breakwater, and Marine Terminals**. 4th Edition. Houston, TX, EUA: Gulf Publishing Company, 1993.

CANDLE, R.D. **Goodyear Scrap Tire Floating Breakwater Concepts**. Proceedings of the Floating Breakwaters Conference, pp. 193-212, Kingston, EUA: University of Rhode Island, 1974.

CANDLE, R.D.; FISCHER W.J. **Scrap Tire Shore Protection Structure**, unnumbered report. Akron, Ohio, EUA: The Goodyear Tire and Rubber Co., 1976.

CERDEIRA, V.S.R. **Estudo sobre as Características Físicas de um Canal de Ondas**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.

COASTALWIKI, <http://www.coastalwiki.org> (vários acessos)

DEAN.R.G e DALRYMPLE R.A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall,1984.

ENGENHARIA CIVIL NA INTERNET, www.engenhariacivil.com, Portugal. (vários acessos)

ÉPOCA NEGÓCIOS ONLINE, <http://epocanegocios.globo.com>, acesso em Novembro 2011, Brasil.

FARMER, A.L. **Investigation into Snap Loading of cables Used in Moored Breakwaters**. Blacksburg, Virginia, EUA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.

FENTON, J. **Coastal and Ocean Engineering**. Vienna: Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, 2010

FOX, R.W et al. **Introdução á Mecânica dos Fluidos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.

GIRELI, T.Z. **Modelação Física em canal da geração de ondas regulares e irregulares para Estudo de Quebra-mar de Enrocamento**. São Paulo, Brasil, 2008.

_____. **Notas de Aula**. São Paulo, Brasil, 2009.

HARMS, V.W. **Wave Transmission and Mooring-Force and Characteristics of Pipe-Tire Floating Breakwaters**. Fort Belvoir, VA, EUA: U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center, 1982.

_____. **Floating Breakwater Performance Comparison**, Berkeley, California, EUA: University of California, 1980.

HOLMES, P. **Coastal Processes: Waves**. St. Lucia: University of the West Indies, 2001.

HORIKAWA, K. **Coastal Engineering/An Introduction to Ocean Engineering**. Tokyo: Halsted Press Book/John Wiley & Sons, 1978.

INMETRO e IDEC. **Meio Ambiente e Consumo**. Coleção para o Consumo Responsável, Brasil, 2002.

MARTINEZ, M., A., B. **Notas de Aula**. São Paulo, Brasil, 2011.

MASSEL, S.R. **Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction**. Singapore: World Scientific, 2006.

MICHIMA, P.S.S. **Estudo de um absorvedor de ondas ativo para um tanque didático**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

MILES, J.W. **On the generation of surface waves by shear flows**. J. Fluid Mech, 1957.

MODERNO DICIONÁRIO DA LÍNGUA PORTUGUESA, <http://michaelis.uol.com.br>, acesso em abril de 2012, Brasil.

MORANG, A., U.S. **Coastal Engineering Manual Glossary of Coastal Terminology**. Engineer Manual, EM-1110-2-1100. EUA: Army Corps of Engineers, ago. 2003.

OCHI, M.K. **Ocean Waves**. Inglaterra: Cambridge University Press, 1998.

PERRIE, W. **Nonlinear Ocean Waves**. Advances in Fluid Mechanics, Volume 17. Southhampton, Boston: Computational Mechanics Publications, 1998.

PHILLIPS, O. M. **On the generation of waves by turbulent wind**. J. Fluid Mech, 1957.

PIMENTA,C.F., **Curso de Hidráulica Geral**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981.

POR DENTRO DAS ONDAS, <http://pordentrodasondas.blogspot.com>, acesso em fevereiro de 2012, Brasil.

PORTAL DO PET, <http://reutilizandopets.blogspot.com/2009/09/pet-boletim-tecnico.html>, acesso em maio de 2011, Brasil.

QUINN,A.D. **Design and Construction of Ports and marine Structures**. Chapter 4 Breakwaters, 2nd Edition. New York, EUA: Mc-Graw-Hill Book Company, 1972.

SCIORTINO,J.A. **Fishing harbor planning, construction and management**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Itália,2010.

SILVESTER, R. **Coastal Engineering, I - Generation, propagation and influence of waves**. Developments in Geotechnical Engineering 4A. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company, 1974.

SILVA, G.C. **Análise Comparativa de Metodologias de Modelagem Numérica da Propagação de Ondas Aplicada à Engenharia Costeira e Portuária**. São Paulo, Brasil, 2003.

SORENSEN, R.M. **Basic Coastal Engineering**. 3rd edition. New York: Springer, 2006.

_____. **Basic Wave Mechanics for Coastal and Ocean Engineers**. New York: John Wiley, 1993.

_____. **U.S. Coastal Engineering Manual Part II- Harbor Hydrodynamics**, Engineer Manual, EM-1110-2-1100. Bethlehem, EUA: Army Corps of Engineers, ago.2008.

STITT,R.L. **Wave-maze floating breakwater, Brochure**. Temple City, California, EUA, 1963 (revised 1977).

TUREKIAN,K.,K.**Oceanos**. São Paulo, Brasil: Editora Edgard Blücher, 1969.

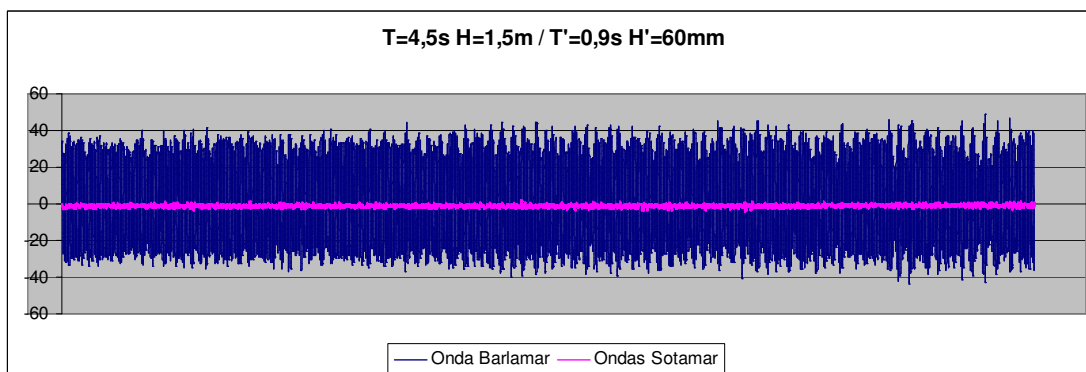
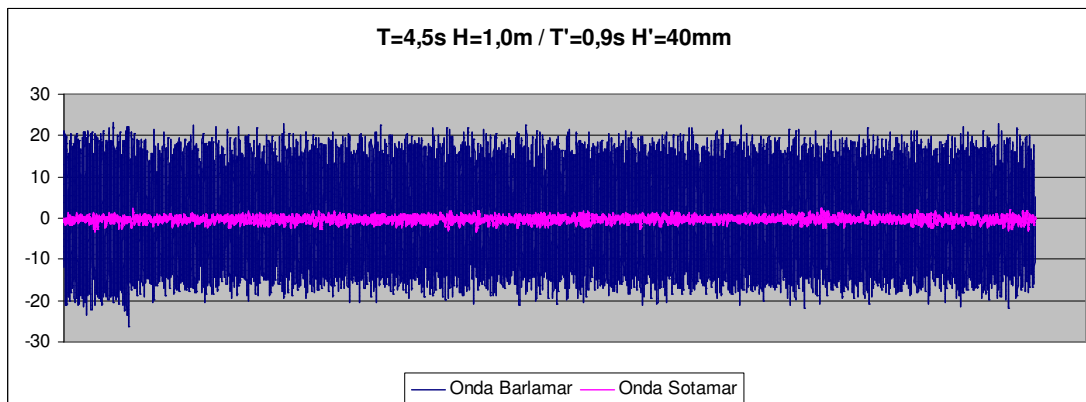
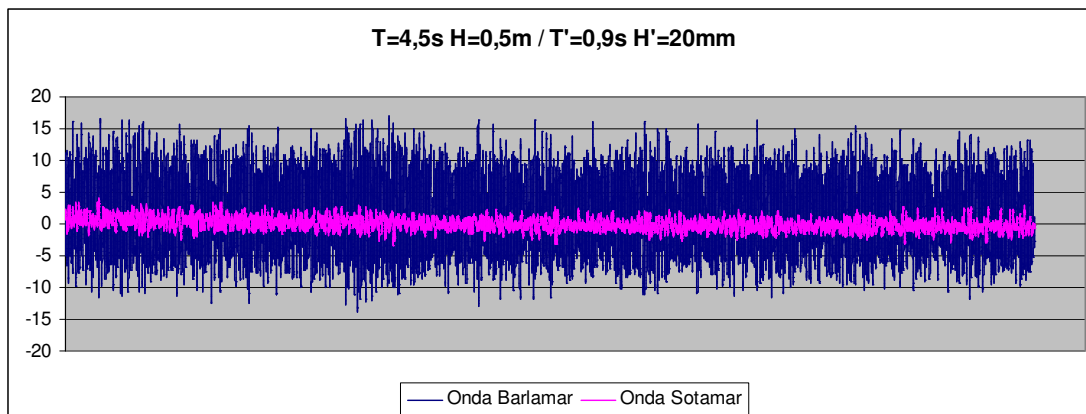
USACE - U.S. Army Corp of Engineers. **Shore Protection Manual**. EUA: Coastal Engineering Research Center, 1984.

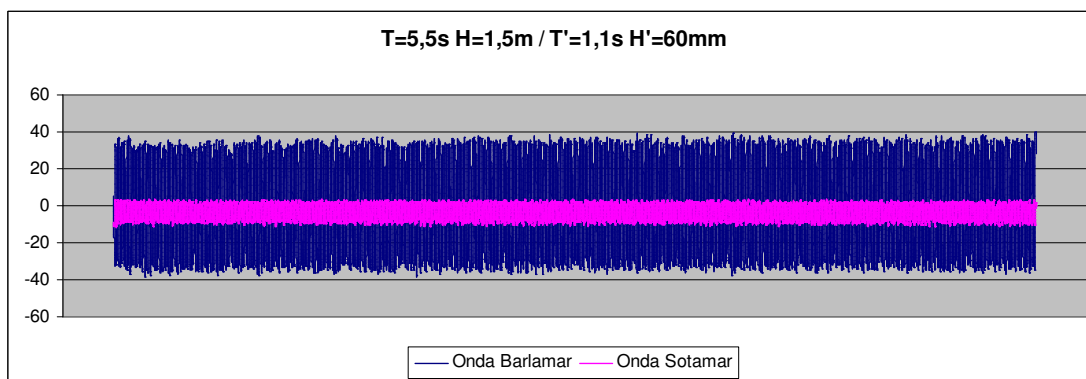
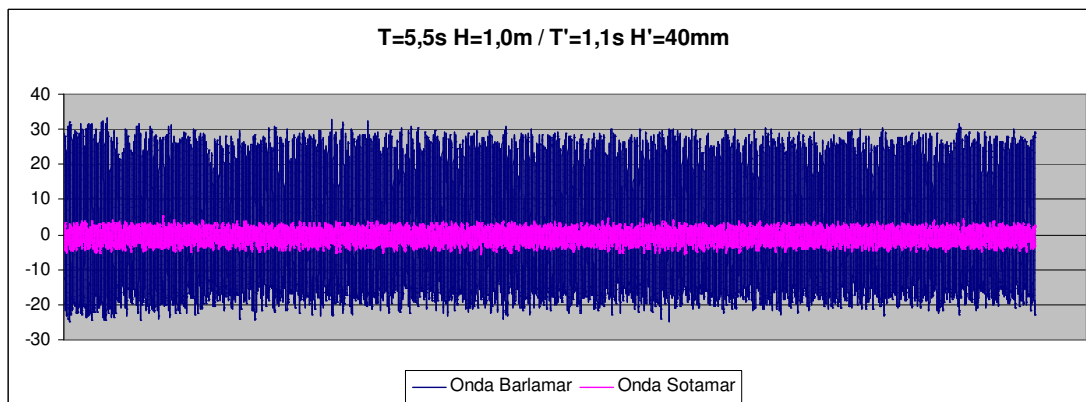
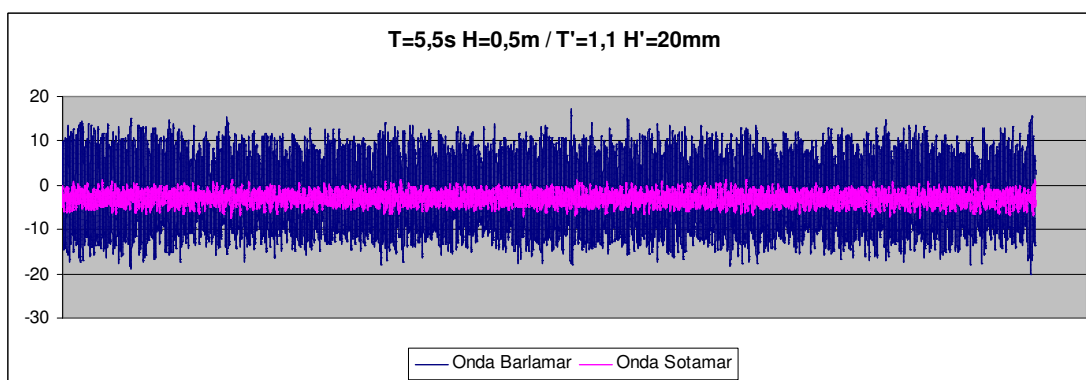
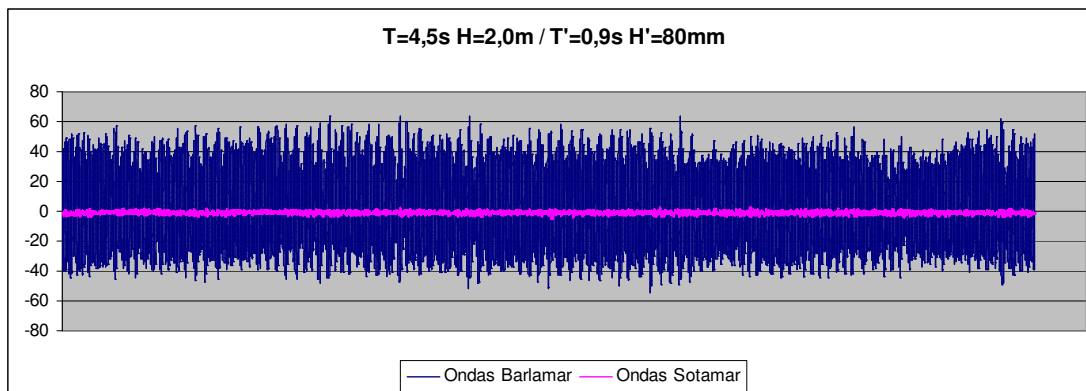
VELDEE, M.A. **Floating Breakwater Wave Attenuation and Mooring Force Performance**. Washington, EUA: Royal Institute of Technology Stockholm Sweden, 1983.

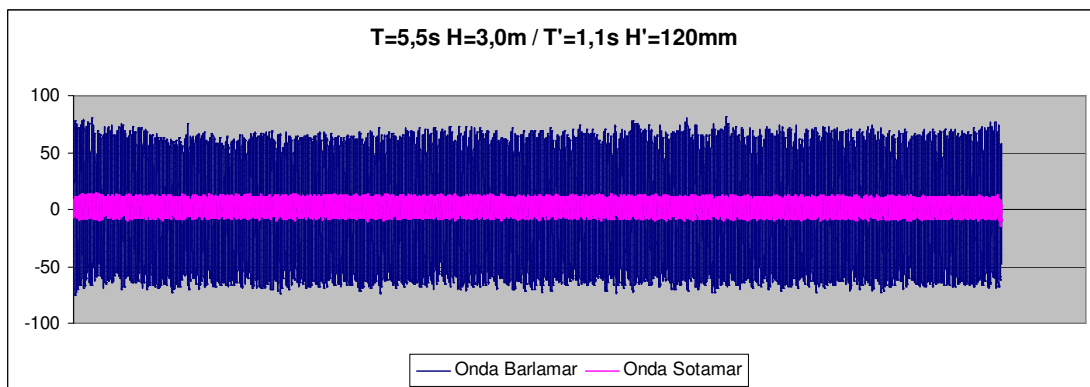
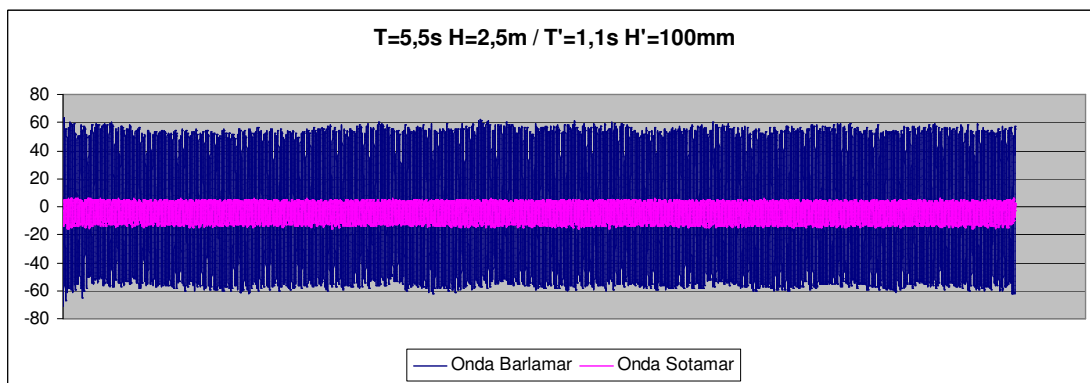
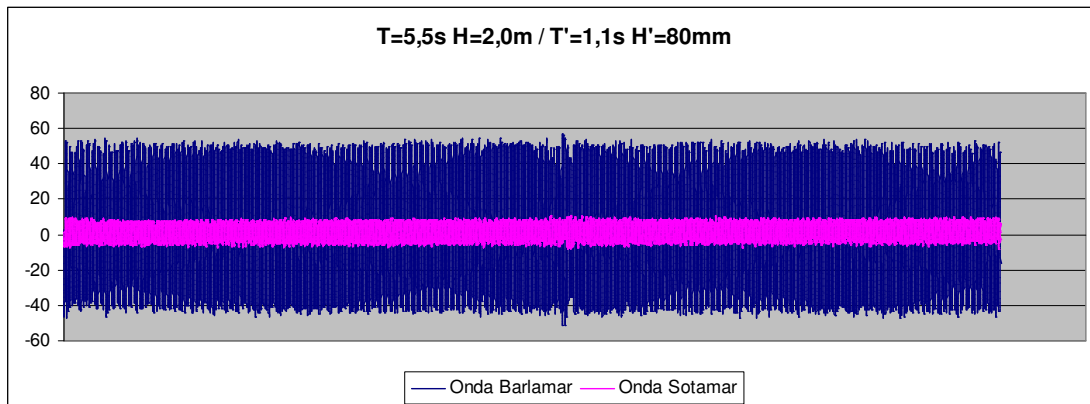
VILAÇA,R.M. **Controle de Posição de um Gerador de Ondas Utilizando um Servo-Mecanismo Hidráulico**. Rio de Janeiro, 2005.

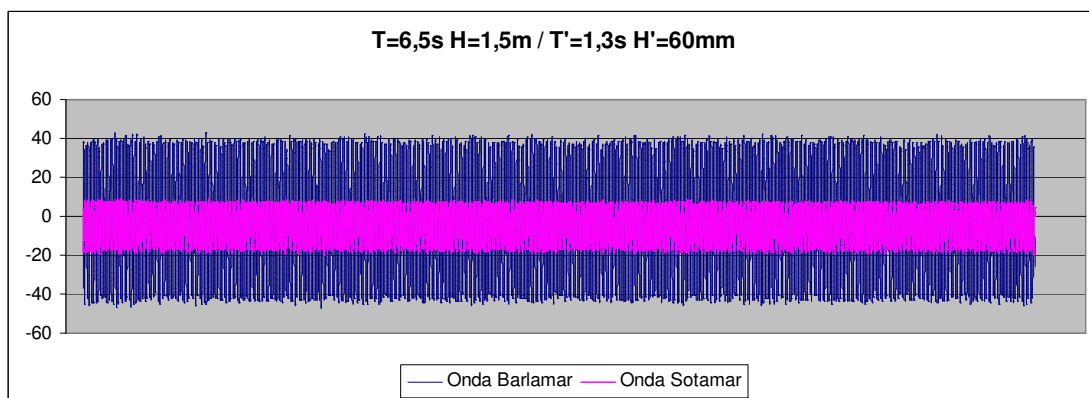
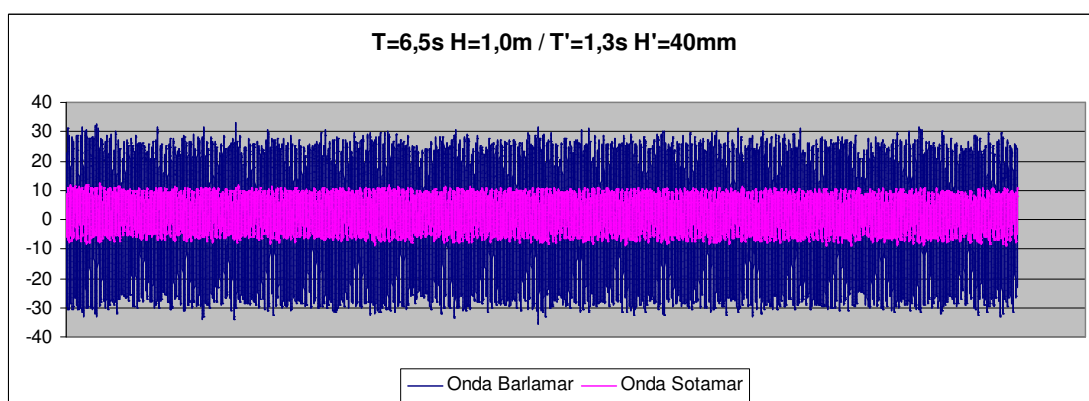
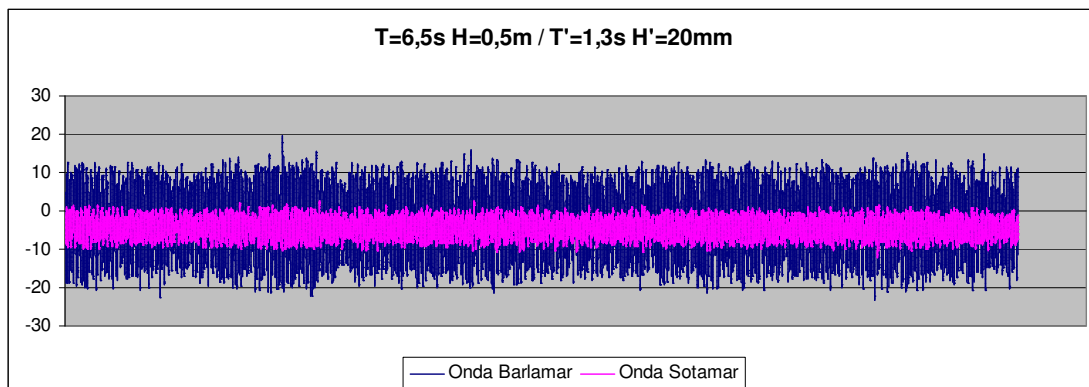
WERNER,G., **Experiences with Floating Breakwaters a Literature Review**. Stockholm, Sweden: PIANC Bulletin nº 63, 1988.

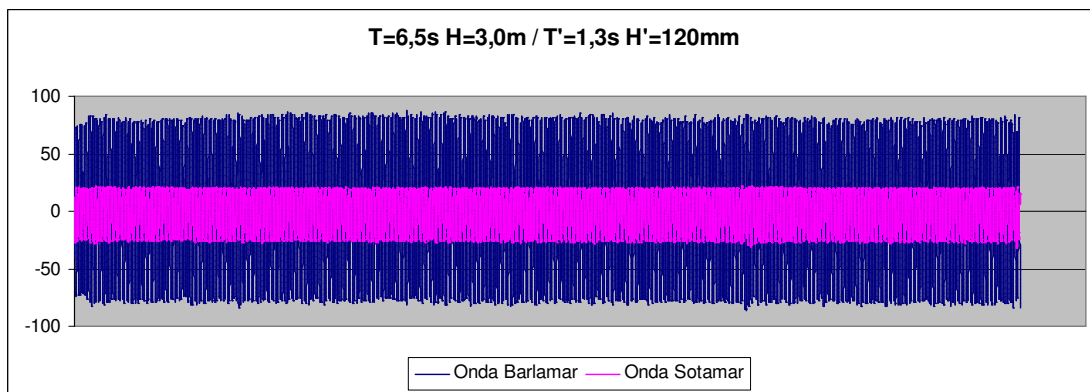
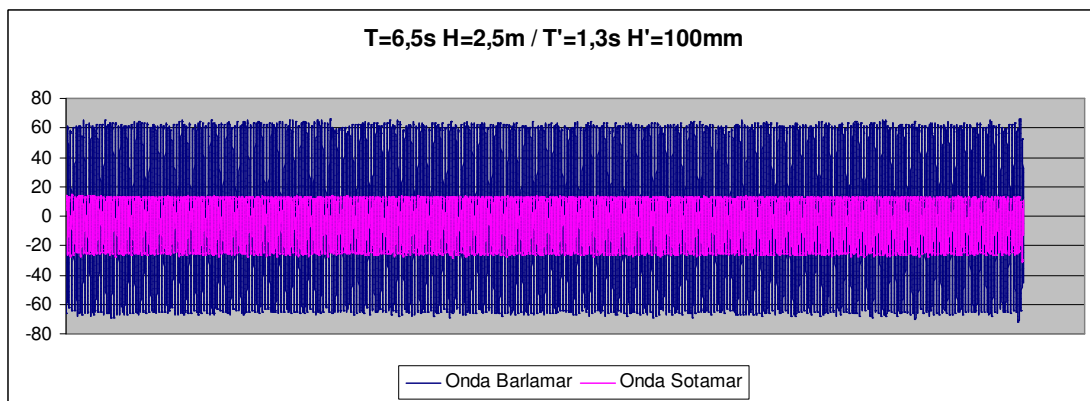
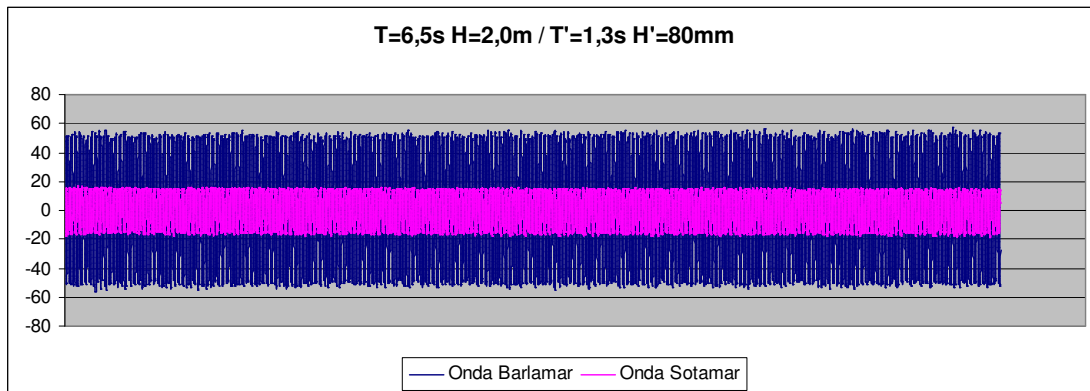
ANEXOS

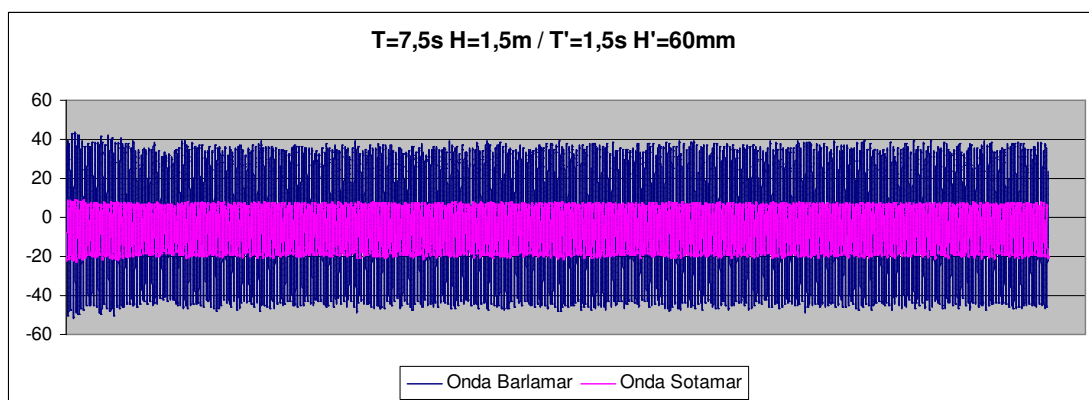
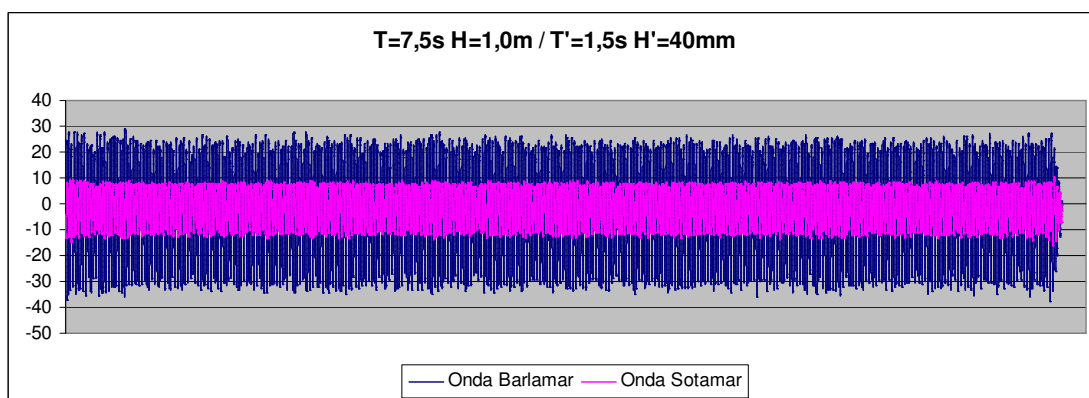
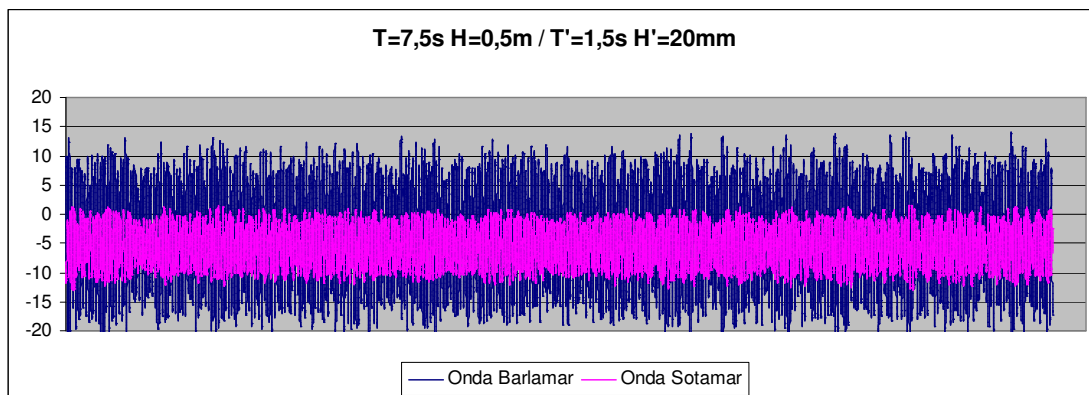
ANEXO A - GRÁFICOS DA REDUÇÃO DE ONDA

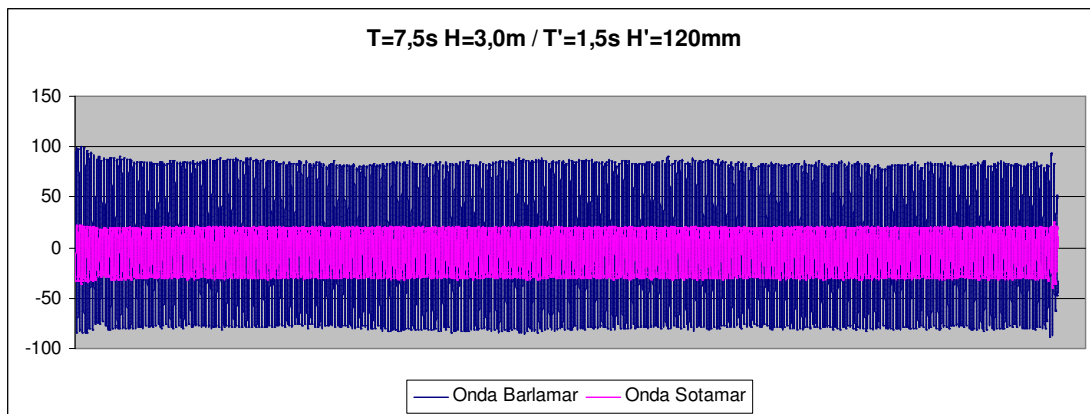
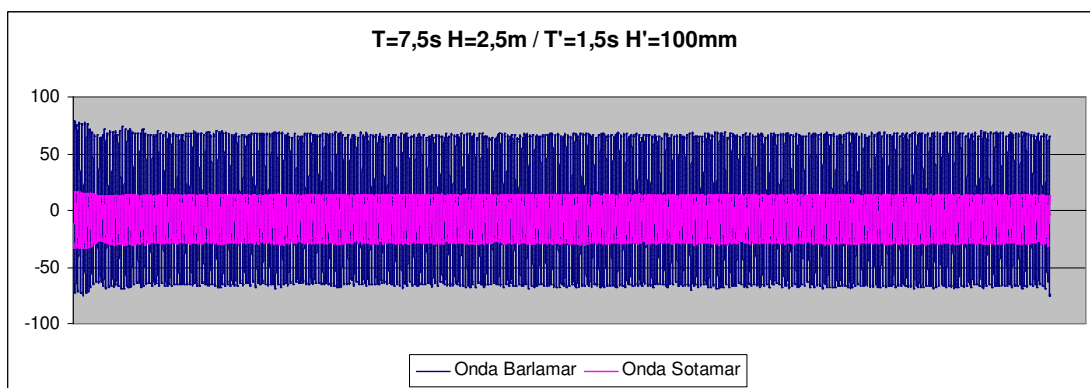
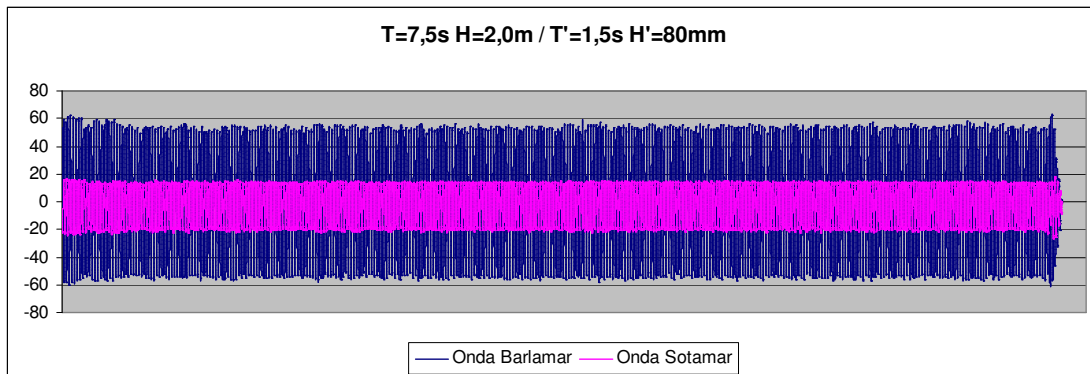


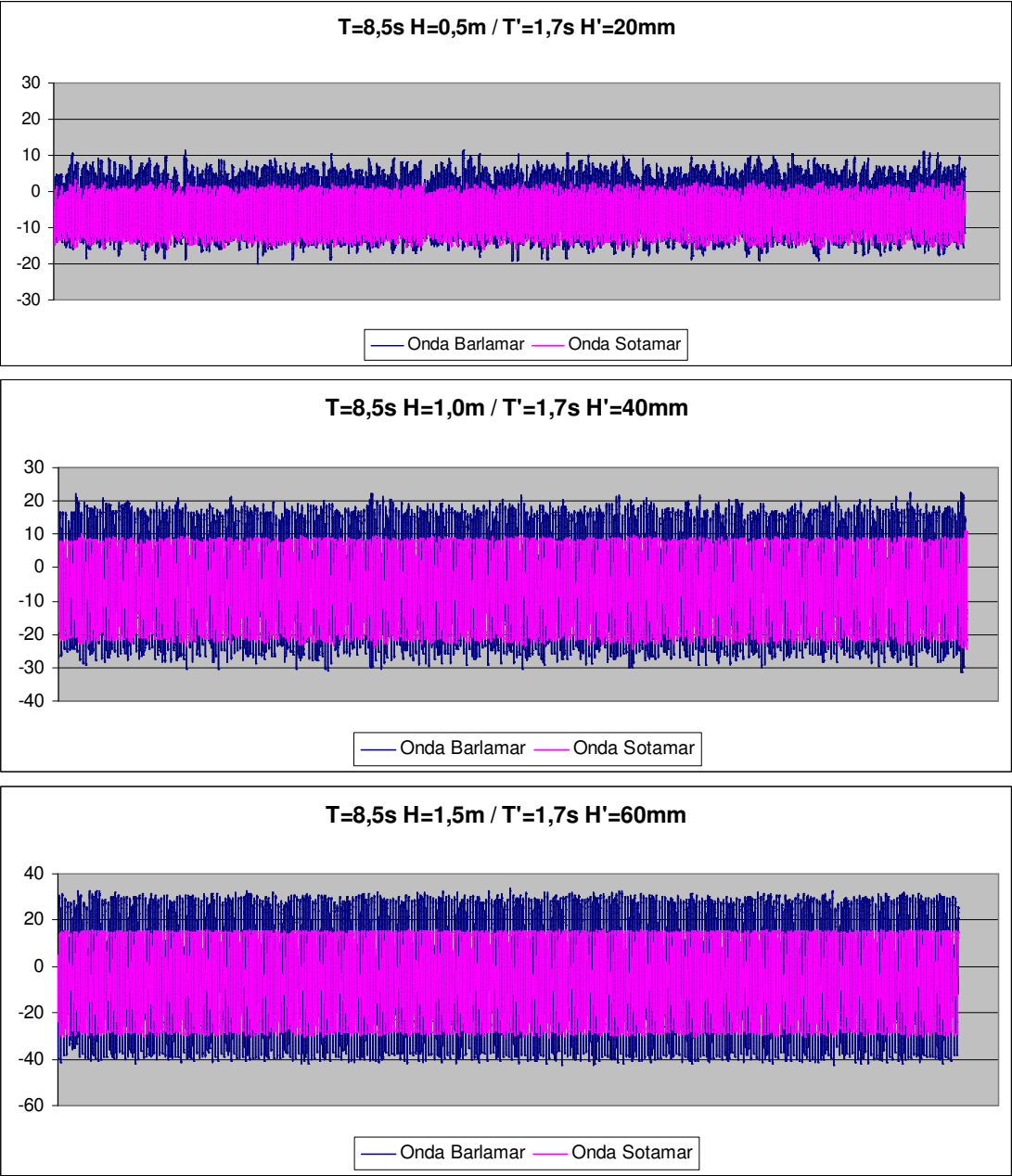


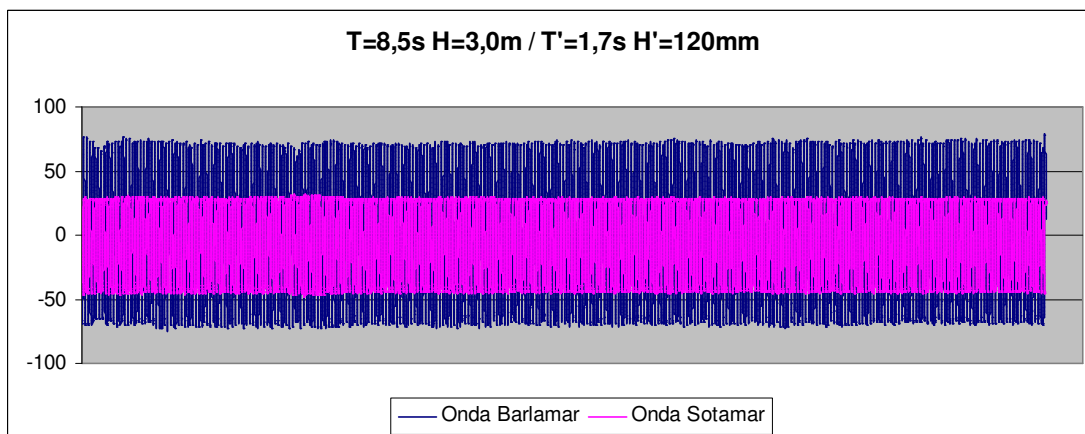
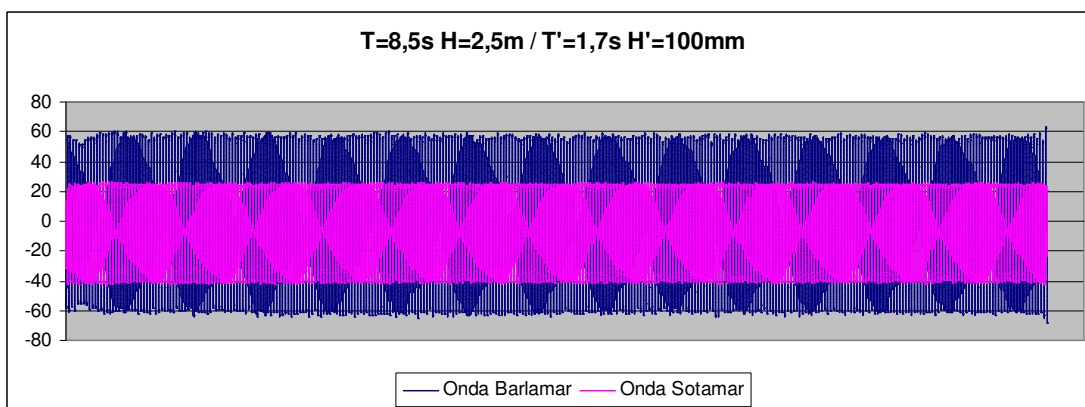
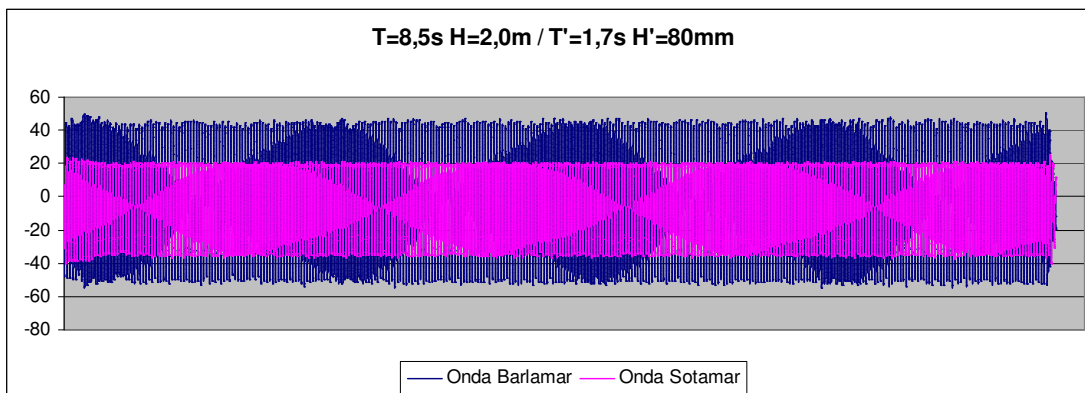












ANEXO B - ANÁLISE ESTATÍSTICA

T=4,5s H=0,5m / T'=0,9s H'=20mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	19.988	29.369	5.955
Hs (mm)	19.988	21.4559	1.71364
Hmed (mm)	19.9859	17.2835	0.95709
Tmáx (s)	0.9	1.14	2.82
Ts (s)	0.9	0.99999	0.76259
Tmed (s)	0.89949	0.87975	0.30426

T=4,5s H=1,0m / T'=0,9s H'=40mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	39.976	48.561	4.834
Hs (mm)	39.976	38.3027	1.39706
Hmed (mm)	39.9718	34.4645	0.8295
Tmáx (s)	0.9	1.04	2.66
Ts (s)	0.9	0.952	0.57956
Tmed (s)	0.89949	0.89737	0.24192

T=4,5s H=1,5m / T'=0,9s H'=60mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	59.964	86.667	5.347
Hs (mm)	59.964	73.2328	1.54196
Hmed (mm)	59.9577	64.4164	0.88779
Tmáx (s)	0.9	0.96	2.66
Ts (s)	0.9	0.92237	0.62182
Tmed (s)	0.89949	0.90025	0.25776

T=4,5s H=2,0m / T'=0,9s H'=80mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	79.952	110.578	7.288
Hs (mm)	79.952	91.3911	2.28714
Hmed (mm)	79.9436	77.6832	1.18413
Tmáx (s)	0.9	1	2.68
Ts (s)	0.9	0.93308	0.7701
Tmed (s)	0.89949	0.89987	0.31998

$T=5,5s$ $H=0,5m$ / $T'=1,1s$ $H'=20mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	19.992	35.146	7.686
Hs (mm)	19.992	27.2594	4.91059
Hmed (mm)	19.9918	23.3931	2.70185
Tmáx (s)	1.1	1.2	2.14
Ts (s)	1.1	1.13503	1.18215
Tmed (s)	1.09942	1.09958	0.66048

$T=5,5s$ $H=1,0m$ / $T'=1,1s$ $H'=40mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	39.984	56566	9.886
Hs (mm)	39.984	50.6953	7.33895
Hmed (mm)	39.9836	46.9275	5.42403
Tmáx (s)	1.1	1.14	1.3
Ts (s)	1.1	1.11838	1.15807
Tmed (s)	1.09942	1.09981	0.91713

$T=5,5s$ $H=1,5m$ / $T'=1,1s$ $H'=60mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	59.976	75.66	14.797
Hs (mm)	59.976	71.5873	12.7734
Hmed (mm)	59.9754	68.4109	11.6277
Tmáx (s)	1.1	1.12	1.22
Ts (s)	1.1	1.11232	1.13783
Tmed (s)	1.09942	1.09902	1.0899

$T=5,5s$ $H=2,0m$ / $T'=1,1s$ $H'=80mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	79.968	108.246	18.531
Hs (mm)	79.968	96.5937	14.8954
Hmed (mm)	79.9672	92.9017	13.6793
Tmáx (s)	1.1	1.14	1.22
Ts (s)	1.1	1.10994	1.13042
Tmed (s)	1.09942	1.09884	1.09562

T=5,5s H=2,5m / T'=1,1s H'=100mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	99.96	130.534	21.491
Hs (mm)	99.96	115.544	19.009
Hmed (mm)	99.9591	111.63	17.8234
Tmáx (s)	1.1	1.14	1.18
Ts (s)	1.1	1.10899	1.12627
Tmed (s)	1.09942	1.09913	1.09882

T=5,5s H=3,0m / T'=1,1s H'=120mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	119.952	153.407	23.952
Hs (mm)	119.952	139.131	21.0976
Hmed (mm)	119.951	131.8	19.4215
Tmáx (s)	1.1	1.14	1.2
Ts (s)	1.1	1.11329	1.12383
Tmed (s)	1.09942	1.0986	1.09848

T=6,5s H=0,5m / T'=1,3s H'=20mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	19.994	40.745	13.433
Hs (mm)	19.994	30.9711	9.83464
Hmed (mm)	19.994	27.2267	7.5172
Tmáx (s)	1.3	1.44	1.48
Ts (s)	1.3	1.34972	1.37074
Tmed (s)	1.29977	1.29745	1.14936

T=6,5s H=1,0m / T'=1,3s H'=40mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	39.988	66.852	20.257
Hs (mm)	39.988	59.2011	17.9928
Hmed (mm)	39.988	55.3736	16.463
Tmáx (s)	1.3	1.34	1.42
Ts (s)	1.3	1.31917	1.34207
Tmed (s)	1.29977	1.29717	1.28954

T=6,5s H=1,5m / T'=1,3s H'=60mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	59.982	89.505	28.054
Hs (mm)	59.982	84.2136	25.7018
Hmed (mm)	59.982	81.3934	24.5301
Tmáx (s)	1.3	1.34	1.36
Ts (s)	1.3	1.31306	1.32556
Tmed (s)	1.29977	1.29735	1.29879

T=6,5s H=2,0m / T'=1,3s H'=80mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	79.976	110.802	33.677
Hs (mm)	79.976	106.314	32.1617
Hmed (mm)	79.976	103.212	30.9504
Tmáx (s)	1.3	1.34	1.34
Ts (s)	1.3	1.31035	1.32397
Tmed (s)	1.29977	1.2974	1.29877

T=6,5s H=2,5m / T'=1,3s H'=100mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	99.97	134.503	41.667
Hs (mm)	99.97	130.441	39.9175
Hmed (mm)	99.97	127.606	38.9512
Tmáx (s)	1.3	1.34	1.34
Ts (s)	1.3	1.31356	1.31554
Tmed (s)	1.29977	1.29608	1.29773

T=6,5s H=3,0m / T'=1,3s H'=120mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	119.964	169.975	51.652
Hs (mm)	119.964	162.774	47.216
Hmed (mm)	119.964	158.768	45.9288
Tmáx (s)	1.3	1.32	1.34
Ts (s)	1.3	1.31069	1.31306
Tmed (s)	1.29977	1.29648	1.29796

$T=7,5s$ $H=0,5m$ / $T'=1,5s$ $H'=20mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	19.996	37.392	14.393
Hs (mm)	19.996	29.7551	11.8539
Hmed (mm)	19.996	26.0383	9.56681
Tmáx (s)	1.5	1.7	1.66
Ts (s)	1.5	1.56868	1.54886
Tmed (s)	1.5	1.49654	1.37648

$T=7,5s$ $H=1,0m$ / $T'=1,5s$ $H'=40mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	39.992	63.25	24.852
Hs (mm)	39.992	58.8313	21.0995
Hmed (mm)	39.992	54.8549	19.5685
Tmáx (s)	1.5	1.58	1.58
Ts (s)	1.5	1.53618	1.52885
Tmed (s)	1.5	1.49372	1.49028

$T=7,5s$ $H=1,5m$ / $T'=1,5s$ $H'=60mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	59.986	94.953	32.052
Hs (mm)	59.986	84.5163	28.084
Hmed (mm)	59.986	80.7925	26.8053
Tmáx (s)	1.5	1.54	1.56
Ts (s)	1.5	1.51535	1.51937
Tmed (s)	1.5	1.49648	1.4974

$T=7,5s$ $H=2,0m$ / $T'=1,5s$ $H'=80mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	79.982	121.73	43.558
Hs (mm)	79.982	111.654	36.477
Hmed (mm)	79.982	107.434	35.0029
Tmáx (s)	1.5	1.56	1.58
Ts (s)	1.5	1.51298	1.51677
Tmed (s)	1.5	1.49028	1.49775

$T=7,5s$ $H=2,5m$ / $T'=1,5s$ $H'=100mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	99.978	151.856	50.295
Hs (mm)	99.978	136.832	43.7327
Hmed (mm)	99.978	133.474	42.5523
Tmáx (s)	1.5	1.54	1.52
Ts (s)	1.5	1.51457	1.51318
Tmed (s)	1.5	1.49653	1.49756

$T=7,5s$ $H=3,0m$ / $T'=1,5s$ $H'=120mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	119.974	184.364	61.661
Hs (mm)	119.974	167.887	51.7774
Hmed (mm)	119.974	163.401	50.445
Tmáx (s)	1.5	1.58	1.62
Ts (s)	1.5	1.51492	1.51031
Tmed (s)	1.5	1.49702	1.49794

$T=8,5s$ $H=0,5m$ / $T'=1,7s$ $H'=20mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	19.996	30.14	18.678
Hs (mm)	19.996	24.5254	16.6956
Hmed (mm)	19.996	20.7539	14.7518
Tmáx (s)	1.7	1.92	1.8
Ts (s)	1.7	1.79316	1.73897
Tmed (s)	1.69667	1.64914	1.64

$T=8,5s$ $H=1,0m$ / $T'=1,7s$ $H'=40mm$

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	39.994	53.896	33.335
Hs (mm)	39.994	47.4333	31.4339
Hmed (mm)	39.9257	43.996	30.1544
Tmáx (s)	1.7	1.8	1.74
Ts (s)	1.7	1.73456	1.72439
Tmed (s)	1.69667	1.69199	1.69748

T=8,5s H=1,5m / T'=1,7s H'=60mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	59.99	75.134	46.385
Hs (mm)	59.99	71.7004	45.0066
Hmed (mm)	59.8876	69.0108	44.0489
Tmáx (s)	1.7	1.78	1.74
Ts (s)	1.7	1.72549	1.71186
Tmed (s)	1.69667	1.6974	1.69805

T=8,5s H=2,0m / T'=1,7s H'=80mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	79.986	104.816	65.908
Hs (mm)	79.986	98.0841	57.0137
Hmed (mm)	79.8494	95.2548	57.0137
Tmáx (s)	1.7	1.8	1.84
Ts (s)	1.7	1.7214	1.71281
Tmed (s)	1.69667	1.69726	1.69843

T=8,5s H=2,5m / T'=1,7s H'=100mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	99.982	123.331	68.896
Hs (mm)	99.982	120.626	67.0705
Hmed (mm)	99.8113	118.139	66.0101
Tmáx (s)	1.7	1.74	1.72
Ts (s)	1.7	1.71434	1.71027
Tmed (s)	1.69667	1.69706	1.69788

T=8,5s H=3,0m / T'=1,7s H'=120mm

	<u>Onda Gerada</u>	<u>Ponta Barlamar</u>	<u>Ponta Sotamar</u>
Hmáx (mm)	119.98	147.823	79.147
Hs (mm)	119.98	143.835	75.1044
Hmed (mm)	119.775	141.318	73.8806
Tmáx (s)	1.7	1.74	1.72
Ts (s)	1.7	1.70814	1.70867
Tmed (s)	1.69667	1.69759	1.69829

ANEXO C - REDUÇÃO

T=4,5s H=0,5m / T'=0,9s H'=20mm

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	95.2	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	91.4	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	-14	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	7.34	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	4.79	%
Reflete	-14	%
Dissipa	109	%

A reflexão é negativa devido ao posicionamento da ponta capacitiva que não está exatamente na face do modelo, mas afastados 0,1m tanto à barlar e quanto à sotamar. Para T'=0,9s e, portanto comprimento de onda, $\lambda'=1,26m$ a leitura é feita fora do ventre da onda refletida. Devido ao sinal negativo da reflexão a dissipação passa a valer mais de 100%.

T=4,5s H=1,0m / T'=0,9s H'=40mm

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	97.9	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	96.5	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	-14	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	-4.2	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	2.08	%
Reflete	-14	%
Dissipa	112	%

A reflexão é negativa devido ao posicionamento da ponta capacitiva que não está exatamente na face do modelo, mas afastados 0,1m tanto à barlar e quanto à sotamar. Para T'=0,9s e, portanto comprimento de onda, $\lambda'=1,26m$ a leitura é feita fora do ventre da onda refletida. Devido ao sinal negativo da reflexão a dissipação passa a valer mais de 100%.

$T=4,5s$ $H=1,5m$ / $T'=0,9s$ $H'=60mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	98.5	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	97.4	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	7.44	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	22.1	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	1.48	%
Reflete	7.44	%
Dissipa	91.1	%

$T=4,5s$ $H=2,0m$ / $T'=0,9s$ $H'=80mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	98.5	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	97.1	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	-2.8	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	14.3	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	1.48	%
Reflete	-2.8	%
Dissipa	101	%

A reflexão é negativa devido ao posicionamento da ponta capacitiva que não está exatamente na face do modelo, mas afastados 0,1m tanto à barlar e quanto à sotamar. Para $T'=0,9s$ e, portanto comprimento de onda, $\lambda'=1,26m$ a leitura é feita fora do ventre da onda refletida. Devido ao sinal negativo da reflexão a dissipação passa a valer mais de 100%.

$T=5,5s$ $H=0,5m$ / $T'=1,1s$ $H'=20mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	86.5	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	75.4	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	17	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	36.4	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	13.5	%
Reflete	17	%
Dissipa	69.5	%

$T=5,5s$ $H=1,0m$ / $T'=1,1s$ $H'=40mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	86.4	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	81.6	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	17.4	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	26.8	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	13.6	%
Reflete	17.4	%
Dissipa	69.1	%

$T=5,5s$ $H=1,5m$ / $T'=1,1s$ $H'=60mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	80.6	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	78.7	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	14.1	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	19.4	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	19.4	%
Reflete	14.1	%
Dissipa	66.5	%

$T=5,5s$ $H=2,0m$ / $T'=1,1s$ $H'=80mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	82.9	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	81.4	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	16.2	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	20.8	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	17.1	%
Reflete	16.2	%
Dissipa	66.7	%

$T=5,5s$ $H=2,5m$ / $T'=1,1s$ $H'=100mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>			
taxa de redução (em termos da onda média)	82.2	%	
taxa de redução (em termos da onda significativa)	81	%	
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>			
taxa de reflexão (em termos da onda média)	11.7	%	
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	15.6	%	
<u>Resumo</u>			
	Transfere	17.8	%
	Reflete	11.7	%
	Dissipa	70.5	%

$T=5,5s$ $H=3,0m$ / $T'=1,1s$ $H'=120mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>			
taxa de redução (em termos da onda média)	83.8	%	
taxa de redução (em termos da onda significativa)	82.4	%	
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>			
taxa de reflexão (em termos da onda média)	9.88	%	
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	16	%	
<u>Resumo</u>			
	Transfere	16.2	%
	Reflete	9.88	%
	Dissipa	73.9	%

$T=6,5s$ $H=0,5m$ / $T'=1,3s$ $H'=20mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>			
taxa de redução (em termos da onda média)	62.4	%	
taxa de redução (em termos da onda significativa)	50.8	%	
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>			
taxa de reflexão (em termos da onda média)	36.2	%	
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	54.9	%	
<u>Resumo</u>			
	Transfere	37.6	%
	Reflete	36.2	%
	Dissipa	26.2	%

$T=6,5s$ $H=1,0m$ / $T'=1,3s$ $H'=40mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	58.8	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	55	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	38.5	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	48	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	41.2	%
Reflete	38.5	%
Dissipa	20.4	%

$T=6,5s$ $H=1,5m$ / $T'=1,3s$ $H'=60mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	59.1	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	57.2	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	35.7	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	40.4	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	40.9	%
Reflete	35.7	%
Dissipa	23.4	%

$T=6,5s$ $H=2,0m$ / $T'=1,3s$ $H'=80mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	61.3	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	59.8	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	29.1	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	32.9	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	38.7	%
Reflete	29.1	%
Dissipa	32.2	%

$T=6,5s$ $H=2,5m$ / $T'=1,3s$ $H'=100mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	61	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	60.1	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	27.6	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	30.5	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	39	%
Reflete	27.6	%
Dissipa	33.4	%

$T=6,5s$ $H=3,0m$ / $T'=1,3s$ $H'=120mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	61.7	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	60.6	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	32.3	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	35.7	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	38.3	%
Reflete	32.3	%
Dissipa	29.4	%

$T=7,5s$ $H=0,5m$ / $T'=1,5s$ $H'=20mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	52.2	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	40.7	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	30.2	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	48.8	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	47.8	%
Reflete	30.2	%
Dissipa	21.9	%

$T=7,5s$ $H=1,0m$ / $T'=1,5s$ $H'=40mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	51.1	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	47.2	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	37.2	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	47.1	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	48.9	%
Reflete	37.2	%
Dissipa	13.9	%

$T=7,5s$ $H=1,5m$ / $T'=1,5s$ $H'=60mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	55.3	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	53.2	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	34.7	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	40.9	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	44.7	%
Reflete	34.7	%
Dissipa	20.6	%

$T=7,5s$ $H=2,0m$ / $T'=1,5s$ $H'=80mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	56.2	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	54.4	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	34.3	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	39.6	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	43.8	%
Reflete	34.3	%
Dissipa	21.9	%

$T=7,5s$ $H=2,5m$ / $T'=1,5s$ $H'=100mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>			
taxa de redução (em termos da onda média)	57.4	%	
taxa de redução (em termos da onda significativa)	56.3	%	
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>			
taxa de reflexão (em termos da onda média)	33.5	%	
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	36.9	%	
<u>Resumo</u>			
	Transfere	42.6	%
	Reflete	33.5	%
	Dissipa	23.9	%

$T=7,5s$ $H=3,0m$ / $T'=1,5s$ $H'=120mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>			
taxa de redução (em termos da onda média)	58	%	
taxa de redução (em termos da onda significativa)	56.8	%	
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>			
taxa de reflexão (em termos da onda média)	36.2	%	
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	39.9	%	
<u>Resumo</u>			
	Transfere	42	%
	Reflete	36.2	%
	Dissipa	21.8	%

$T=8,5s$ $H=0,5m$ / $T'=1,7s$ $H'=20mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>			
taxa de redução (em termos da onda média)	26.2	%	
taxa de redução (em termos da onda significativa)	16.5	%	
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>			
taxa de reflexão (em termos da onda média)	3.79	%	
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	22.7	%	
<u>Resumo</u>			
	Transfere	73.8	%
	Reflete	3.79	%
	Dissipa	22.4	%

$T=8,5s$ $H=1,0m$ / $T'=1,7s$ $H'=40mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	24.5	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	21.4	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	10.2	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	18.6	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	75.5	%
Reflete	10.2	%
Dissipa	14.3	%

$T=8,5s$ $H=1,5m$ / $T'=1,7s$ $H'=60mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	26.4	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	25	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	15.2	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	19.5	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	73.6	%
Reflete	15.2	%
Dissipa	11.2	%

$T=8,5s$ $H=2,0m$ / $T'=1,7s$ $H'=80mm$

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	28.6	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	28.7	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	19.3	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	22.6	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	71.4	%
Reflete	19.3	%
Dissipa	9.31	%

T=8,5s H=2,5m / T'=1,7s H'=100mm

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	33.9	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	32.9	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	18.4	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	20.6	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	66.1	%
Reflete	18.4	%
Dissipa	15.5	%

T=8,5s H=3,0m / T'=1,7s H'=120mm

<u>Relação Onda Gerada x Ponta Sotamar</u>		
taxa de redução (em termos da onda média)	38.3	%
taxa de redução (em termos da onda significativa)	37.4	%
<u>Relação Onda Gerada x Ponta Barlamar</u>		
taxa de reflexão (em termos da onda média)	18	%
taxa de reflexão (em termos da onda significativa)	19.9	%
<u>Resumo</u>		
Transfere	61.7	%
Reflete	18	%
Dissipa	20.3	%

ANEXO D - PROCESSO DE CÁLCULO DO EMPOLAMENTO

T' (s)	H' (mm)	Ks (h= 0.83)	H'₀	Ks (h= 0.67)	H'(h= 0.67)	H' médio P2	Reduç ão só devid o à obra	Reduçã o absolut a pela onda media (%)	λ/h
0.9	20	0.890	0.022	0.825	0.019	0.001	94.8	95.2	1.54
	40		0.045		0.037	0.001	97.8	97.9	
	60		0.067		0.056	0.001	98.4	98.5	
	80		0.090		0.074	0.001	98.4	98.5	
1.1	20	0.772	0.026	0.723	0.019	0.003	85.6	86.5	2.30
	40		0.052		0.037	0.005	85.5	86.4	
	60		0.078		0.056	0.012	79.3	80.6	
	80		0.104		0.075	0.014	81.7	82.9	
	100		0.129		0.094	0.018	80.9	82.2	
	120		0.155		0.112	0.019	82.7	83.8	
1.3	20	0.706	0.028	0.682	0.019	0.008	61.1	62.4	3.22
	40		0.057		0.039	0.016	57.4	58.8	
	60		0.085		0.058	0.025	57.7	59.1	
	80		0.113		0.077	0.031	60.0	61.3	
	100		0.142		0.097	0.039	59.7	61.0	
	120		0.170		0.116	0.046	60.4	61.7	
1.5	20	0.680	0.029	0.677	0.020	0.010	51.9	52.2	4.28
	40		0.059		0.040	0.020	50.8	51.1	
	60		0.088		0.060	0.027	55.1	55.3	
	80		0.118		0.080	0.035	56.0	56.2	
	100		0.147		0.100	0.043	57.2	57.4	
	120		0.176		0.119	0.050	57.8	58.0	
1.7	20	0.677	0.030	0.689	0.020	0.015	27.6	26.2	5.50
	40		0.059		0.041	0.030	26.0	24.5	
	60		0.089		0.061	0.044	27.9	26.4	
	80		0.118		0.081	0.057	30.0	28.6	
	100		0.148		0.102	0.066	35.2	33.9	
	120		0.177		0.122	0.074	39.5	38.3	